

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

"На правах рукопису"
УДК 621.791

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
В. В. Квасницький

“ ” 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему:

«Вплив конструктивно-технологічних факторів на залишковий
напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань»

Виконав: студент VI курсу, групи ЗВ-61м

Гайнутдінов Сергій Фанісович

(підпис)

Керівник:

Доцент, к.т.н., доц. Прохоренко О. В.

(підпис)

Консультант з охорони праці:

Професор, д.т.н., Левченко О. Г.

(підпис)

Рецензент:

Професор, д.т.н., проф. Рижов Р.М.

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет _____ Зварювальний _____
Кафедра _____ Зварювального виробництва _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 131 Прикладна механіка _____
Спеціалізація _____ Технології та інжиніринг у зварюванні _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. В. Квасницький
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Гайнутдінову Сергію Фанісовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації _____ Вплив конструктивно-технологічних факторів
_____ на залишковий напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань _____

науковий керівник дисертації _____ Прохоренко Одарка Володимирівна, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 10 » квітня 2018 р. №1118 - с

2. Термін подання студентом дисертації _____ 03 травня 2018 р. _____

3. Об'єкт дослідження _____ хрестові зварні з'єднання _____

4. Предмет дослідження *напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань з конструктивною особливістю складання зварюваних пластин «в зуб»* _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Літературний огляд сучасних уявлень про існуючі методи визначення залишкового напружено-деформованого стану у зварних конструкціях і методи розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень, розробка скінченно-елементних моделей і визначення параметрів залишкового напружено-деформованого стану у хрестових зварних з'єднаннях для заданих комбінацій зварювальних матеріалів, розробка скінченно-елементних моделей для визначення коефіцієнтів концентрації напружень і встановлення впливу конструктивно-технологічних факторів на розміри зон концентрації напружень; аналіз розподілу параметрів залишкового напружено-деформованого стану у хрестових зварних з'єднаннях, формулювання висновків; аналіз небезпечних факторів і біофізичні аспекти впливу на організм людини під час роботи за комп'ютером, ризик виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

Презентація результатів розв'язку задач термо-пружно-пластичності у хрестових зварних з'єднаннях для заданих конструкційних матеріалів, конструктивно-технологічні фактори впливу на концентрацію напружень у хрестових зварних з'єднаннях.

7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Вплив геометрії кутових швів хрестових зварних з'єднань на концентрацію напружень
2. Конструктивно-технологічні фактори негативного впливу на міцність кутових швів зварних з'єднань
3. Визначення коефіцієнтів концентрації напружень у хрестових зварних з'єднаннях.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О. Г., зав. каф.		

9. Дата видачі завдання 12 березня 2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Прим.
1	Аналіз і систематизація матеріалів для включення у пояснювальну записку	листопад 2017 р.	
2	Розробка ілюстративної частини дисертації	грудень 2017 р.	
3	Збір додаткових матеріалів, детальна розробка і обґрунтування наукових рішень	січень 2018 р.	
4	Оформлення ілюстративного матеріалу Літературна обробка і остаточне оформлення пояснювальної записки	квітень 2018 р.	

Студент

(підпис)

С. Ф. Гайнутдінов

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О.В. Прохоренко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Хрестові зварні з'єднання з конструктивною особливістю складання «в зуб» є елементом секцій захисних екранів для броньованих машин. Секції захисних екранів являють собою плоскі решітчасті зварні конструкції, які складаються зі сталевих полоси, товщина та ширина якої, а також відстані між її вертикальними і горизонтальними ребрами, обираються з умов забезпечення необхідної стійкості під час ударної взаємодії з протитанковою гранатою та належної руйнівної дії по її бойовій частині. Полоси з'єднуються між собою «в зуб» електродуговим зварюванням плавким електродом у захисному газі за допомогою кутових швів.

Встановлено, що ефективний захист броньованої військової техніки від пробиття сучасними гранатами можливий лише у разі часткового або повного руйнування бойової частини гранати при її взаємодії із елементами екрану і, таким чином, попередження формування кумулятивного струменю та спрацювання протитанкового засобу у штатному режимі. При цьому деформаційно-ріжуча дія робочого елемента захисного екрану на бойову частину засобу ураження залежить від твердості та міцності застосованого матеріалу, стійкості та жорсткості зварної конструкції екрану.

Застосування високоміцних сталей для виготовлення зварних протикумулятивних екранів зумовлює високий рівень залишкових напружень у зварному виробі, які можуть сприяти утворенню і розвитку тріщин, а також спричинити руйнування виробу з необхідністю його подальшого ремонту.

Таким чином, актуальність даної роботи полягає у обґрунтуванні можливості використання низьковуглецевих сталей, замість високоміцних легованих сталей на основі порівняльного аналізу параметрів залишкових напружено-деформованих станів, визначених методом скінчених елементів для зварних вузлів решітчастої конструкції, виготовлених зі сталей трьох різних марок: низьковуглецевих конструкційних сталей звичайної якості Ст3пс і 09Г2С

з границею міцності 490 МПа і 590 МПа та високоміцної низьколегованої сталі 30ХГСА у термообробленому стані з границею міцності 1080 МПа.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались в рамках науково-дослідної роботи №2930-п, номер державної реєстрації №0116U000002д «Підвищення ефективності захисту броньованих об'єктів застосуванням стільникових екранів з модифікованим наплавленням та концентрованими джерелами енергії робочими поверхнями».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка скінченно-елементних моделей хрестового зварного з'єднання для визначення і оцінки параметрів залишкового напружено-деформованого стану та коефіцієнтів концентрації напружень при зварюванні кутових швів.

Для досягнення визначеної мети в роботі вирішені такі задачі:

- розроблена скінченно-елемента модель хрестового зварного з'єднання, яка враховує жорсткість зварного вузла, геометрію конструкції, зміну теплофізичних і механічних властивостей основного металу та зварювальних матеріалів, параметри зварювання, технологічну послідовність зварювання кутових швів;
- розроблені скінченно-елементні моделі хрестових зварних з'єднань для різних комбінацій конструктивних параметрів кутових швів;
- методом скінченних елементів розв'язана термомеханічна задача і визначений розподіл параметрів залишкового напружено-деформованого стану хрестового зварного з'єднання для шести технологічних схем виконання зварних швів;
- методом скінченних елементів розв'язана механічна задача і визначені оптимальні геометричні розміри та форма кутових зварних швів для забезпечення мінімальних значень коефіцієнтів концентрації напружень.

Об'єкт дослідження – хрестові зварні з'єднання з конструктивною особливістю складання «в зуб».

Предмет дослідження – напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводились на основі теорії напружень і деформацій при зварюванні, положень теорії пружності і пластичності, методів математичного моделювання на персональних комп'ютерах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Розроблена скінченно-елемента модель НДС хрестового зварного з'єднання, яка дозволяє визначати параметри напружено-деформованого стану, а також величину переміщень зварного вузла після зварювання з урахуванням жорсткості зварного вузла і послідовностей виконання зварних швів для заданих конструкційних та зварювальних матеріалів.

2. Розроблена скінченно-елемента модель хрестового зварного з'єднання з кутовими швами, яка дозволяє визначати коефіцієнти концентрації напружень для різних комбінацій конструктивних факторів.

3. Вперше виявлені особливості розподілу параметрів напружено-деформованого стану у хрестовому зварному з'єднанні з урахуванням конструктивних особливостей, зумовлених складанням зварюваних пластин «в зуб».

4. Для заданого хрестового зварного з'єднання визначені оптимальні конструктивні параметри кутових зварних швів на основі розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень і локалізації зон концентрації напружень.

Практичне значення одержаних результатів. Використання розроблених скінченно-елементних моделей дозволяє досліджувати кінетику напружень, деформацій і переміщень зварного хрестового з'єднання, прогнозувати рівень залишкових напружень з урахуванням жорсткості зварного вузла для різних технологічних послідовностей виконання зварних швів; рекомендувати радіуси переходу від шва до основного металу, обґрунтовано призначати оптимальні геометричні розміри зварних швів для мінімізації коефіцієнтів концентрації напружень.

Апробація результатів дисертації. Матеріали магістерської дисертації доповідалися і обговорювалися на X та XI Всеукраїнських міжгалузевих науково-

технічних конференціях студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені процеси і технології», 7-9 червня 2017 р. та 10-12 травня 2018 р. відповідно, м. Київ; на X Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції ТНТУ імені Івана Пулюя “ПРИРОДНИЧІ ТА ГУМАНІТАРНІ НАУКИ. АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ”, 25-26 квітня 2017 р., м. Тернопіль.

Публікації. Результати магістерської дисертації опубліковані у трьох збірниках тез доповідей науково-технічних конференцій України.

Магістерська дисертація представлена: 96 стор., 40 рис., 9 табл., 46 джерел.

Ключові слова: НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНА МОДЕЛЬ, ХРЕСТОВІ ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЯ НАПРУЖЕНЬ, SIMUFACT WELDING, SIMULIA ABAQUS.

ABSTRACT

Topic Relevance. Cruciform welded joints with the design feature of «in tooth" assembly are an integral part of the anti-shape effect shields for armored vehicles. Sections of the anti-shape effect shields are flat gridded weld structure, which consist of the steel band, the width and thickness of witch, and distance between vertical and horizontal edges are chosen according to required stability during the hit impact from the high explosive anti-tank projectiles and appropriate destruction action over its warhead. Bands are joined together “in tooth” by the electro-arc welding with the consumable electrode in shielded gas with the use of the fillet welds.

It has been established that effective protection of armored military vehicles against penetration of the modern grenade is possible only in case of partial or complete destruction of grenade warhead when it interacts with the elements of the anti-shape effect shields and, thus, preventing the formation of shape charge focused jet and triggering of the explosive anti-tank projectiles in regular mode. Wherein, the deformation-cutting action of the working element of the anti-shape effect shields on the combat part of the warhead depends on the hardness and strength of the applied material, the stability and rigidity of the welded anti-shape effect shields structure.

The usage of high-strength steels for manufacturing of the welded anti-shape effect shields leads to a high level of residual stresses in the welded structures, which may contribute to the formation and development of cracks, as well as to cause the destruction of the product with the need of its subsequent repair.

Therefore, the relevance of this work is in substantiation of the possibility of using low-carbon steels instead of high-strength alloy steels based on a comparative analysis of the residual stress-strain states parameters determined by the finite element method for weld joints of the gridded type weld structure manufactured from steels of three different grades: low carbon structural steels CT3cп and 09Г2C with ultimate strength of 490 MPa and 590 MPa and high-strength low-alloy steel 30XГCA in a heat-treated state with an ultimate strength of 1080 MPa.

Thesis connection to scientific programs, plans, and topics. The research was carried out within the scope of research work №2930-П of the state registration number 0116U000002Д "Improving the protection effectiveness of the armored vehicles with the use of the gridded type anti-shape effect shields with modified surfacing and concentrated energy sources working surfaces".

Research goal and objectives. The goal of the work is to develop finite element models of the cruciform welded joint to determine and evaluate the parameters of the residual stress-strain state and the stress concentration factors for fillet welds.

To achieve a certain goal in the work the following tasks were solved:

- a finite element model of a cruciform welded joint was created, which takes into account the stiffness of the welded joint during welding process, the structure geometry, the change in the thermal and mechanical properties of the base metal and welding materials, the welding parameters, the technological sequence of the welding;
- a finite element models of cruciform welded joints for various combinations of fillet welds structural parameters;
- with the use of finite element method the thermomechanical problem has been solved and the distribution of residual stress-strain state parameters in the cruciform welded joint for six technological schemes of welding was determines;
- with the use of finite element method the mechanical problem has been solved and the optimal geometric dimensions and shape of the welds were determined to provide the minimum values of stress concentration factors.

The object of research is the cruciform welded joints with the design feature of "in tooth " assembly.

The subject of research is the stress-strain state of the cruciform welded joints.

Methods of research. Theoretical researches were carried out on the basis of the theory of stress and strains during welding, the positions of the theory of elasticity and plasticity, methods of mathematical modeling on personal computers.

Scientific contribution of the results obtained is as follows:

1. A finite element model of a stress-strain state of cruciform welded joint was developed, which allows to determine the parameters of the stress-strain state, as well

as the size of the welded joint displacements after welding, taking into account the stiffness of the joint and the sequences of the welding for the specified structural and welding materials.

2. A finite element model of a cruciform welded joint with fillet welds was developed, which allows determining the stress concentration factors for various combinations of constructive parameters.

3. For the first time the peculiarities of the stress-strain state parameters distribution in a cruciform welded joints with the consideration of the design features due to the assembly of the welded plates "in tooth" are revealed.

4. For the specified cruciform welded joint optimal design parameters of the welds are determined on the basis of stress concentration factors calculation and localization of the zones with stress concentration.

Practical value of obtained results. The use of developed finite element models allows to research the kinetics of stresses, deformations and displacements of the cruciform welded joints, to predict the level of residual stresses which takes into account the stiffness of the welded joint for different technological sequences of the welds; to recommend the radii of transition from the weld to the base metal, it is justified to assign the optimal geometric dimensions of the welds to minimize the stress concentration factors.

Approbation of the thesis results. Materials of the Master's thesis were presented and discussed during the X and XI All-Ukrainian interdisciplinary scientific and technical conferences of students, postgraduates and research staff "Welding and Applied Processes and Technologies", June 7-9, 2017 and May 10-12, 2018, respectively, Kyiv; at the X All-Ukrainian Student Scientific and Technical Conference of Ivan Pulya, TNTU "NATURAL AND HUMAN SCIENCES. TOPICAL QUESTIONS ", April 25-26, 2017, Ternopil city.

Publications. The results of the Master's thesis are published in three abstract report collections of scientific and technical conferences of Ukraine.

Master's thesis includes: 96 pages., 40 fig., 9 tables., 46 sources.

Keywords: STRESS-STRAIN STATE, FINIT-ELEMENT MODEL, CRUCIFORM WELD JOINTS, STRESS CONCENTRATION, SIMUFACT WELDING, SIMULIA ABAQUS.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень	14
Вступ	15
РОЗДІЛ 1 Вплив конструктивно-технологічних факторів на залишковий напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань	16
1.1 Класифікація конструктивно-технологічних факторів	16
1.2 Вплив конструктивних факторів на концентрацію напружень у зварних з'єднаннях	18
1.3 Вплив технологічних факторів на залишковий напружено-деформований стан у зварних з'єднаннях	21
1.4 Методи визначення коефіцієнту концентрації напружень в зварних з'єднаннях	23
1.5 Методи визначення залишкового напружено-деформованого стану	25
1.5.1 Розрахункові методи визначення НДС зварних конструкцій	25
1.5.2. Числові методи визначення НДС зварних конструкцій.....	29
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2 Числове моделювання залишкового напружено-деформованого стану хрестових зварних з'єднань	35
2.1 Методика скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану хрестового зварного з'єднання	35
2.2 Аналіз параметрів залишкового напружено-деформованого стану для досліджуваних конструкційних матеріалів	44
2.3 Визначення впливу технологічних схем виконання зварних швів на залишковий напружено-деформований стан.....	57
Висновки до розділу 2	68
РОЗДІЛ 3 Визначення коефіцієнтів концентрації напружень для заданих конструктивних параметрів кутових зварних швів	70
3.1 Розробка скінченно-елементної моделі хрестового зварного з'єднання для визначення коефіцієнту концентрації напружень	70

3.2 Визначення оптимальних параметрів зварних швів з урахуванням концентрації напружень	73
Висновки до розділу 3	82
РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	83
4.1 Негативні фактори під час роботи з комп'ютером	84
4.2 Вимога безпеки праці та інженерні розв'язки при роботі з комп'ютером....	86
4.2.1 Основні вимоги з охорони праці до користувачів комп'ютера	86
4.2.2 Вимоги охорони праці до приміщення для роботи з комп'ютером ...	87
4.2.3 Вимоги охорони праці до робочого місця користувача комп'ютера .	87
4.2.4 Вимоги охорони праці до режиму праці і відпочинку користувача комп'ютера.....	88
4.2.5 Профілактичні засоби для забезпечення пожежної безпеки	88
4.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	89
4.3.1 Дії працівників у разі ураження електричним струмом	89
4.3.2 Дії працівників у разі виникнення пожежі	89
Висновки до розділу 4	90
Загальні висновки	91
Перелік посилань.....	93
ДОДАТКИ.....	97

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень

НДС – напружено-деформований стан;

ККН – коефіцієнт концентрації напружень;

ЗТВ – зона термічного впливу;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

E – модуль пружності, ГПа;

$I_{зв}$ – зварювальний струм, А;

Q – ефективна теплова потужність джерела нагрівання, Вт;

q – теплова потужність джерела нагрівання, Вт;

$q_{vol}(x, y, z)$ – об'ємна щільність теплової потужності джерела нагрівання, Вт/м³;

$q_{п}$ – погонна енергія зварювання, Дж/мм;

$U_{зв}$ – напруга зварювання, В;

$V_{зв}$ – швидкість зварювання, м/год;

δ_5 – відносне подовження, %;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С;

ρ – густина, кг/м³;

$\sigma_{0,2}$ – границя плинності, МПа;

σ_B – границя міцності, МПа;

K – катет шва, мм;

Вступ

Сучасні технології проектування і виготовлення зварних конструкцій є наукоємним процесом. Жорстка конкуренція вимагає скорочення термінів розробки і економічних витрат, що неможливо без застосування сучасних високоефективних засобів автоматизації праці інженерів. З цією метою сьогодні широко використовуються системи автоматизованого проектування, область застосування яких давно вийшла за рамки проектування і охоплює практично весь життєвий цикл зварного виробу. Впродовж останнього десятиліття для вирішення таких складних питань, як розрахунок залишкового напружено-деформованого стану (НДС) зварних конструкцій успішно використовують обчислювальний експеримент, суть якого полягає в тому, що на основі математичної моделі в результаті безпосереднього числового розв'язання відповідних рівнянь кількісно визначають величину і розподіл параметрів НДС у досліджуваному зварному виробі. Для вирішення зв'язаних задач про термопружно-пластичну поведінку матеріалу під час зварювання з подальшим визначенням параметрів НДС зварного виробу оптимальними є спеціалізовані програмні комплекси такі як «SIMUFACT WELDING» і «VISUAL WELD». Найпоширенішим, на сьогодні, числовим методом, застосовуваним в таких комплексах, є метод скінченних елементів (МСЕ). Однак, окрім проблеми визначення величини і розподілу залишкових зварювальних напружень на залишковий експлуатаційний ресурс зварного виробу також впливає таке явище, як концентрація напружень. Концентрація напружень - один із основних чинників, які визначають надійність і довговічність конструкцій. Зварні шви – концентратори напружень. Зважаючи на те, що захисний протикумулятивний екран експлуатують в умовах значних ударних навантажень необхідне вирішення задачі механіки руйнування з визначення коефіцієнтів концентрації напружень (ККН) і оцінка впливу конструктивних факторів зварних швів на величину ККН за допомогою пакетів типу «SIMULIA ABAQUS», «ANSYS», NASTRAN та інших.

РОЗДІЛ 1 Вплив конструктивно-технологічних факторів на залишковий напружено-деформований стан хрестових зварних з'єднань

1.1 Класифікація конструктивно-технологічних факторів

Якість і надійність експлуатаційних показників зварних конструкцій забезпечується технологічним процесом виготовлення. Основними етапами проектування технологічного процесу виготовлення виробу є: вибір конструкційного матеріалу виробу та зварювальних матеріалів, вибір технології зварювання. Комбінація вхідних параметрів технологічного процесу виготовлення (раціональний вибір способу зварювання, вибір типів швів та їх конструктивних розмірів, форм підготовки крайок, визначення режимів зварювання, вибір послідовності виконання зварних швів) впливає на залишковий напружено-деформований стан і обумовлює міцність зварного вузла і конструкції в цілому [1,2].

Ударні, циклічні навантаження підвищують чутливість матеріалу до концентрацій напружень, яка має місце при нераціональній конструкції зварних з'єднань, наявності дефектів при порушенні технологічних процесів зварювання і складання. Тріщини найчастіше зароджуються на лінії сплавлення шва з основними металом, що пояснюється наявністю різкого переходу від основного метала до шва, причому у кутових швах концентрація напружень є більшою ніж у стикових. Коефіцієнти концентрації напружень у зварних швах значно більші за одиницю, оскільки самі зварні шви є концентраторами напружень, що зменшує втомну міцність зварних з'єднань у декілька разів. У більшості випадків зменшення рівня залишкових напружень підвищує границю витривалості, тому для обґрунтованого вибору оптимального варіанту (з позиції забезпечення міцності і мінімальних спотворень геометричної форми виробу) технологічного процесу виготовлення хрестового зварного з'єднання необхідно проаналізувати вплив, зазначених на рис. 1.1 конструктивно-технологічних факторів.

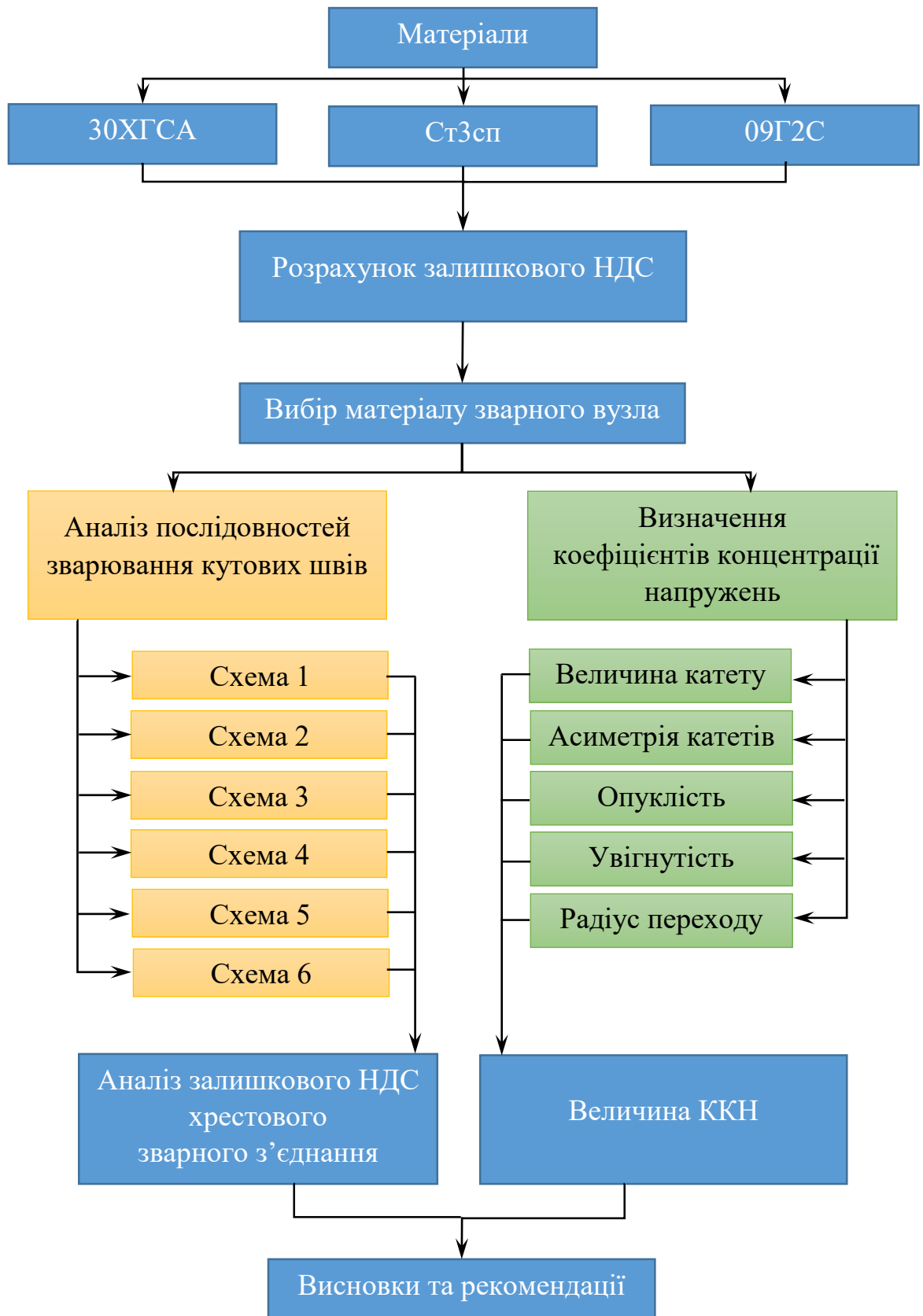


Рисунок 1.1 – Класифікація конструктивно-технологічних факторів впливу на залишковий НДС хрестового зварного з'єднання

1.2 Вплив конструктивних факторів на концентрацію напружень у зварних з'єднаннях

Визначення максимальних напружень при пружному деформуванні пов'язано з множенням номінальних напружень на величину теоретичного коефіцієнта концентрації напружень, який є кількісною оцінкою рівня концентрації напружень.

Відомо, що при заданих зовнішніх силових факторах, які діють на елемент конструкції з будь-яким зварним швом, на величину ККН впливають не властивості матеріалу, а вид концентратора, його гострота і геометричні параметри.

На підставі даних теорії пружності і експериментальних досліджень [3] встановлено, що форма швів значно впливає на розподіл в них напружень від дії зовнішнього навантаження. У місці переходу від основного металу до шва напруження зростають.

Концентрація напружень, зумовлена формою шва, має місце в зоні сполучення шва з основним металом і залежить від величини підсилення шва і радіуса переходу. Концентрація різко зростає при зменшенні радіусу до часток міліметра.

Експерименти і розрахунки показують, що в кутових швах існує значна концентрація напружень, яка залежить від конфігурації поперечного перерізу, тобто глибини проплавлення ε , кута при вершині β і напрямку дії прикладеної сили (рис. 1.2). Концентрація значно знижується при збільшенні глибини проплавлення ε і збільшенні кута β , в разі дії навантаження вздовж протилежного катета.

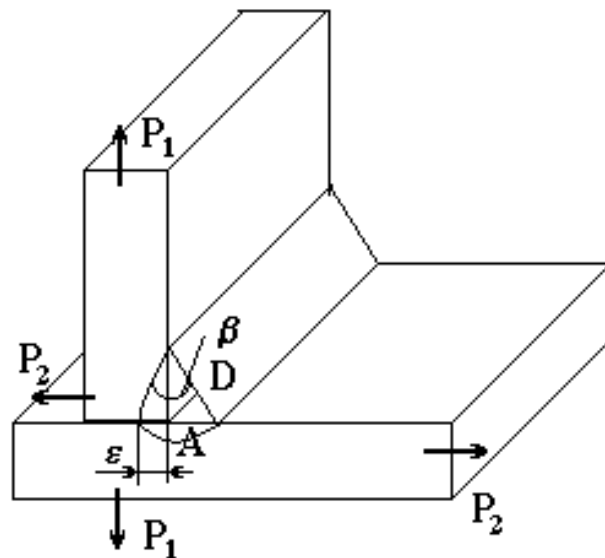


Рисунок 1.2 – Геометричні характеристики кутового зварного шва

Концентрація напружень має місце також в лобових швах таврових і хрестових з'єднань - з'єднання "впритул" (рис. 1.3). Найбільша концентрація напружень виникає в з'єднаннях з непроваром, який змінює силовий потік і створює додаткову концентрацію напружень.

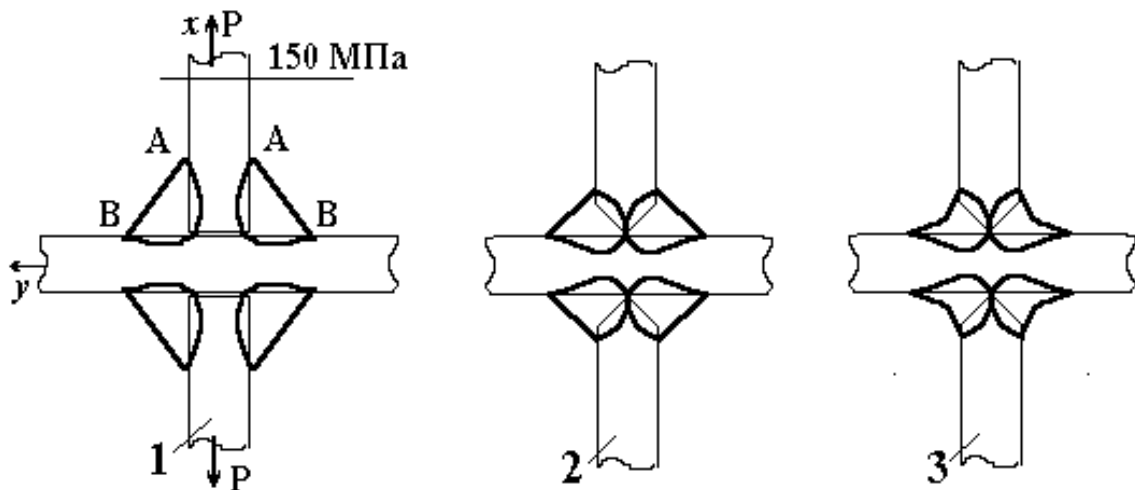


Рисунок 1.3 – Форми хрестоподібних зварних з'єднань «впритул»

Відомо, що концентрація напружень, як правило, не враховується в розрахунках на міцність і ці розрахунки, виконують за середніми (номінальними) напруженням.

Для того, щоб врахувати її вплив, вводиться ряд технологічних і експлуатаційних рекомендацій. Для цього необхідно знати основні закони і характер розподілу напружень від робочих навантажень в конструкціях і вміти визначати їх експериментальним або розрахунковим шляхами.

Характер розподілу напружень в зоні концентрації визначають із застосуванням різних методів: теоретичного, заснованого на методах теорії пружності [4], конформного відображення [5, 6], Колосова-Мусхелішвілі [7], числових методів [8, 9] та інших.

Застосування різних методів призводить до отримання значень ККН, які істотно відрізняються один від одного. Так мінімальні значення ККН для стикових з'єднань знаходяться в діапазоні від 1,26 до 2,38 для різних класів сталей і способів зварювання [8], а максимальні значення ККН в діапазоні від 2,04 до 6,90 для тих же класів за формулами [7].

Аналогічні дослідження проводились і для зварних з'єднань з кутовими швами. Визначення величини ККН у таврових з'єднаннях засноване на застосуванні теоретичного підходу із застосуванням числових розв'язків задач теорії пружності.

Застосування теоретичного підходу описано в роботах [10-14], в яких отримані вирази для визначення ККН у таврових з'єднаннях. У той же час в роботі [15] ребро таврового з'єднання імітовано виступом, для якого вирішена більш загальна задача теорії пружності із застосуванням методу конформного відображення в два етапи і отримані значення ККН в межах 3,15 ... 3,35.

Хрестові з'єднання характеризуються тим, що в них виникає більша концентрація напружень, ніж у таврових, і величина ККН досягає значення 5,7 згідно з дослідженнями [16].

Таким чином, визначення величин ККН для заданих геометричних розмірів зварних кутових швів для заданого хрестового вузла дозволить визначити і оптимізувати конструктивні особливості для виконуваних швів.

1.3 Вплив технологічних факторів на залишковий напружено-деформований стан у зварних з'єднаннях

Зварювальні напруження та деформації значно впливають на працездатність, як зварної конструкції в цілому, так і окремого зварного вузла, оскільки вони викликають зміну запроектованих розмірів, в результаті чого відбувається спотворення форми окремих зварних вузлів та конструкцій, а також збільшується вірогідність руйнування зварних конструкцій під час експлуатації під дією прикладених навантажень, внаслідок значних залишкових зварювальних напружень. Тому заходи для зниження залишкових напружень і деформацій необхідно планувати ще на стадії проектування. Забезпечення якісного технологічного процесу виготовлення зварного виробу в подальшому дозволить підвищити експлуатаційну надійність конструкції.

Технологічними факторами впливу є вибір основного металу та зварювальних матеріалів. Для якісного виготовлення зварної конструкції необхідно щоб вони забезпечували гарну зварюваність та не мали схильності до утворення зварювальних дефектів. Крім того, конструкційний матеріал для виготовлення зварного вузла необхідно вибирати таким чином, щоб забезпечити найменший рівень залишкових зварювальних напружень. При цьому пластичні властивості зварювальних матеріалів повинні забезпечувати властивості зварних швів на рівні не нижчому за властивості основного металу.

Для виготовлення зварного захисного протикумулятивного екрану раціональним конструкційним матеріалом з точки зору забезпечення стійкості та жорсткості зварної конструкції екрану є сталь 30ХГСА з високими показниками міцності, яка, однак, вимагає додаткових технологічних заходів для зменшення складнощів під час зварювання. Таким чином, необхідно додатково проаналізувати можливості використання низьковуглецевих сталей звичайної якості Ст3пс і 09Г2С (які мають гарну здатність до зварювання), замість високоміцної легованої сталі 30ХГСА.

В процесі зварювання необхідно дотримуватися технологічних правил, які визначають напрямок та порядок заварювання швів, так як усадкові напруження, які утворюються під час зварювання у шві спричинятимуть значні тимчасові переміщення, які під час охолодження перейдуть у залишкові. Раціональний вид з'єднання та правильний вибір послідовності виконання швів забезпечить мінімальні усадкові напруження та мінімальні переміщення і деформації після зварювання.

Хрестові зварні з'єднання – з'єднання з близьким взаємним розташуванням зварних швів. Наслідком цього є те, що зварювання кожного наступного шва поступово підвищує жорсткість вузла і спричиняє відповідний перерозподіл внутрішніх розтягувальних зварювальних напружень, таким чином, що може розпочатись розвиток мікротріщин.

Вибір оптимальної послідовності заварювання швів дозволяє забезпечити в найбільш навантажених швах мінімальний рівень залишкових розтягувальних напружень. Крім того, раціональна послідовність заварювання швів забезпечує ліквідацію деформування від попереднього шва зворотною деформацією після накладання наступного зварного шва [17].

Таким чином, далі в роботі доцільно проаналізувати вплив на залишковий НДС зварного хрестового вузла наступних факторів: технологічних властивостей конструкційних матеріалів - сталей Ст3сп, 09Г2С, 30ХГСА; вплив шести різних технологічних послідовностей виконання зварних швів для вибраного, за критерієм міцності зварного вузла, конструкційного матеріалу.

1.4 Методи визначення коефіцієнту концентрації напружень у зварних з'єднаннях

Методи визначення ККН для хрестоподібних з'єднань обумовлені, в першу чергу, їх конструкцією. Тому в основі розрахункового методу визначення ККН використовуються ті ж залежності, що і для таврових з'єднань. При цьому підвищення концентрації напружень, викликане розподілом силових потоків через кутові шви, необхідно враховувати за допомогою спеціально введеного коефіцієнта, величина якого безпосередньо залежить від товщини зварюваних пластин, ширини зазору і катету шва.

Отримані розбіжності між значеннями ККН за допомогою методів, описаних в [4-9], хоч і не дають можливості прийти до єдиного методу визначення величини ККН, тим не менш визнані достовірними. Деякі з них наведені в довідковій літературі [18-21], а також у вітчизняних стандартах.

Проблема, яка виникає при застосуванні описаних вище методів і залежностей для визначення ККН, полягає в тому, що ці залежності не вносять ясності у визначення ступеня точності одержуваних за допомогою них результатів. Також для даних залежностей не вказуються області їх застосування, в результаті чого можуть виникати великі відмінності в отриманих значеннях, для одних і тих же умов.

Більшість робіт, пов'язаних з визначенням впливу величини ККН діючих в зварних з'єднаннях ґрунтуються на використанні МСЕ. Аналіз даних, отриманих в результаті використання МСЕ свідчить про те, що існуючі аналітичні залежності можуть бути використані тільки для визначення конструктивного ККН в з'єднаннях, а ККН, пов'язаний з мікрогеометричними параметрами шва, для кожного випадка визначається окремо.

Дослідження, присвячені вивченню ККН у стикових, таврових і хрестових з'єднаннях були виконані також із застосуванням методу скінченних елементів [22], що дозволило проаналізувати велику кількість числових експериментів.

Для випадку осьового розтягу таврових (рис. 1.4, а) і хрестових (рис. 1.4, б) зварних з'єднань виведені емпіричні залежності (1.1) і (1.2) відповідно:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 0,32 \left\{ \frac{(\sin \theta)^{0,49}}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,64}{k} + \frac{0,005}{k \cdot \tan \theta} \right) \right]^{0,58}} + \frac{1}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,64}{k+s/2} + \frac{0,005}{H} \right) \right]^{0,58}} - \frac{1}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,64}{k} + \frac{0,005}{H} \right) \right]^{0,58}} \right\} \quad (1.1)$$

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 0,494 \left\{ \frac{(\sin \theta)^{0,83}}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,96}{k} + \frac{0,076}{k \cdot \tan \theta} \right) \right]^{0,55}} + \frac{1}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,96}{k+s/2} + \frac{0,076}{H} \right) \right]^{0,55}} - \frac{1}{\left[\rho \left(\frac{1}{s} + \frac{0,96}{k} + \frac{0,076}{H} \right) \right]^{0,55}} \right\} \quad (1.2)$$

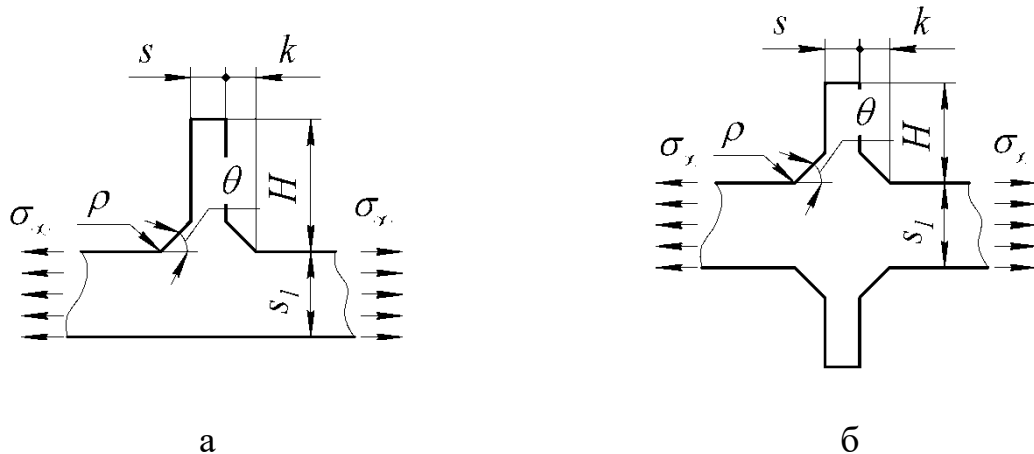


Рисунок 1.4 – Розрахункові схеми для визначення ККН у зварних з'єднаннях:
а) для таврового; б) для хрестового

У формулах (1.1) - (1.2) прийняті умовні позначення відповідно до ГОСТ 5264-80 [23].

Незважаючи на велику базу створених аналітичних залежностей для визначення величини ККН, існує необхідність в комплексному підході до його вивчення із застосуванням програмного забезпечення на основі МСЕ. Найбільш ефективним методом є побудова скінченно-елементної моделі з використанням правильного типу і розміру елемента, яка враховує геометричні особливості, такі як радіус переходу шва на основний метал і кут профілю шва.

1.5 Методи визначення залишкового напружено-деформованого стану

1.5.1 Розрахункові методи визначення НДС зварних конструкцій

Проблема визначення напружено-деформованого стану виникла одночасно з початком практичного застосування зварювання для отримання нероз'ємних з'єднань.

Процес утворення зварювальних деформацій і напружень характеризується пружно-пластичною поведінкою металу, нестаціонарними температурними умовами, високим рівнем температури при різко нерівномірному її розподілі. У більшості випадків досить складно повно урахувати термомеханічні процеси, які відбуваються в металі при зварюванні. Тому виникає необхідність застосування наближених розрахункових методів визначення зварювальних деформацій і напружень. Вимоги до точності в цих методах забезпечують шляхом вибору ефективних розрахункових схем, які враховують тільки основні, визначальні фактори та нехтують другорядними особливостями процесу.

Утворення тимчасових і залишкових деформацій та напружень при зварюванні пов'язано з об'ємними змінами металу. З поширенням теплоти і вирівнюванням температури відбувається безперервна зміна і перерозподіл об'єму металу. Зміна об'єму металу обумовлена його розширенням при нагріванні і фазовим перетворенням, а перерозподіл об'єму металу є результатом пластичних деформацій і охоплює область, що прилягає до зварного шва. Пластичні деформації у поздовжньому і поперечному, по відношенню до осі шва, напрямках залежать, головним чином, від теплових характеристик процесу зварювання і властивостей металу. Тому перерозподіл об'єму металу в області зварних з'єднань практично однаковий, як у складних конструкціях, так і в найпростіших елементах. Ця обставина дозволяє задачу визначення зварювальних деформацій і напружень розділити на дві частини. У першій з них

визначають залишкові пластичні деформації, які зумовлюють перерозподіл об'єму металу в області зварного з'єднання (термомеханічна задача).

У другій частині визначають деформації конструкції в цілому внаслідок перерозподілу об'єму металу в районі зварних з'єднань (деформаційна задача).

Визначення залишкових пластичних деформацій в області зварних швів виконується на базі розгляду термомеханічних процесів, спричинених зварювальним нагріванням. Ця частина завдання досить специфічна. Розгляд її для різних умов зварювання складає основний зміст теорії зварювальних деформацій і напружень. Друга частина задачі не є специфічною.

Аналогічні завдання розглядають в теорії залишкових напружень, викликаних іншими технологічними процесами, а також в теорії температурних напружень. Розв'язок їх може бути виконаний методами опору матеріалів та прикладної теорії пружності. Поділ задачі зварювальних деформацій і напружень на зазначені дві частини є однією з основних ідей її наближеного розв'язку.

Справа в тому, що при розв'язуванні термомеханічної задачі основне значення має характер розподілу температур, деформацій і напружень у відносно вузькій області, яка розташована за джерелом теплоти і прилягає до осі його переміщення. Опис процесу поширення теплоти в цій області може бути істотно спрощений прийняттям схем потужних швидкодіючих джерел теплоти, а розподіл деформацій і напружень - прийняттям припущення про одномірність напруженого стану. Важливо ще раз відзначити, що розв'язок термомеханічних задач одержують на найпростіших елементах, зосереджуючи свою увагу на зазначеній вище області і використовуючи умову подібності процесу розвитку пластичних деформацій.

При розв'язуванні термомеханічної задачі вдається також спростити вивчення історії процесу утворення деформацій і напружень. Для визначення напружень у цей момент пружно-пластичного деформування елемента досить знати його повну деформацію, якщо він знаходиться під навантаженням, а якщо йде процес розвантаження, то, крім того, необхідно знати деформацію елемента

в момент початку розвантаження. Для області, яка є прилеглою до осі шва і піддається високому нагріванню, це положення означає, що до моменту максимального нагрівання йде процес навантаження, а з моменту охолодження починається процес розвантаження.

Отже, для оцінки залишкових пластичних деформацій вивчення історії процесу можна обмежити розглядом пружно-пластичного деформування того або іншого елемента в момент його максимального нагрівання і після повного охолодження.

Як відзначалось, залишкові пластичні деформації при зварюванні залежать, головним чином, від властивостей металу і теплових характеристик процесу. Що стосується властивостей металу, то можлива їхня ідеалізація, теплові ж характеристики процесу залежать від потужності джерела тепла, товщини елементів, що зварюються, тепловіддачі з поверхні. Крім того, на процес утворення пластичних деформацій впливають характеристики жорсткості елементів і наявність у них початкових напружень. Таким чином, на величину і характер розподілу пластичних деформацій впливає цілий ряд факторів. Одночасне їх урахування викликає певні труднощі. Разом з тим, розрахунки вказують на їх незначний взаємний вплив.

Тому в інженерних методах приймається припущення про малий взаємний вплив зазначених факторів на залишкові пластичні деформації. Це припущення дає можливість розглядати вплив того або іншого фактору ізольовано від інших, а лише потім оцінювати їхню сумарну дію. Основна перевага такого підходу полягає у простоті і наочності розв'язку, що дозволяє довести до аналітичного виразу шукані залежності.

Узагальнимо основні спрощення і припущення, прийняті в інженерних методах визначення зварювальних деформацій і напружень:

1. Задача в цілому розділяється на дві частини - термомеханічну і деформаційну.
2. Мета термомеханічної задачі - оцінити перерозподіл об'єму металу в районі зварного з'єднання внаслідок його пластичних деформацій.

3. Мета деформаційної задачі - визначення переміщень, деформацій і напружень конструкції в цілому, які виникають у результаті пере-розподілу об'ємів металу в районах зварних з'єднань.

4. Розв'язок термомеханічної задачі виконується на простих елементах при наступних припущеннях:

а) приймається одномірність напруженого стану і виконання гіпотези плоских перерізів;

б) спрощується вивчення історії процесу деформування, а саме приймається, що процес нагрівання супроводжується навантаженням, а охолодження - розвантаженням металу (з можливим наступним навантаженням протилежного знаку);

в) приймається діаграма розтягу-стиску для ідеального пружно-пластичного матеріалу і спрощена залежність механічних властивостей від температури;

г) приймаються схеми потужних швидкодіючих джерел теплоти;

д) вплив ряду факторів (тепловіддача, товщина, скінчена жорсткість, початкові напруження) розглядаються ізольовано, тобто робиться припущення про їх незначне відхилення при взаємному впливі.

Відзначимо, що принциповим є припущення про одномірність напруженого стану. У багатьох наближених розрахункових методах (Трочуна, Гатовського, Ніколаєва, Кузьміна, Окерблома та інших) [24-30] визначення НДС зварних конструкцій для розрахунку термічного циклу зварювання застосовуються аналітичні формули академіка М.М. Рикаліна [31], в яких не враховуються структурні перетворення, залежність механічних і теплофізичних властивостей металу від температури, а також приймається додатково цілий ряд спрощень, зазначених вище.

Таким чином, за допомогою інженерних методів розрахунку неможливо досить повно урахувати термомеханічні процеси, які відбуваються в металі при зварюванні. У зв'язку з цим, виникає необхідність використання числових методів для визначення параметрів НДС зварних з'єднань.

1.5.2. Числові методи визначення НДС зварних конструкцій

Числові методи - це прикладний розділ математики, який вивчає питання розробки і застосування методів для отримання розв'язків математичних задач за кінцеве число обчислень. Такі розв'язки повинні без особливих труднощів доводитися до числового результату. Слід зазначити, що розв'язок задачі може бути як в аналітичному вигляді, тобто у вигляді математичних виразів, так і в числовому. Кінцеве число обчислень гарантує принципову можливість довести аналітичний розв'язок до числового результату. Так само можна відзначити, що аналітичні розв'язки існують, але не завжди вдається їх виразити через відомі математичні функції, або вони можуть мати неприйнятно громіздкий вигляд, тому на практиці часто обходять завдання отримання аналітичного розв'язку, задовольняючись лише числовими значеннями результату.

Сучасні числові методи орієнтовані на застосування електронних обчислювальних машин і дозволяють вирішувати завдання з великою кількістю невідомих. Для розв'язку певних видів математичних задач використовують відповідні методи, наприклад: методи числового диференціювання та інтегрування; методи апроксимації та інтерполяції; методи оптимізації та мінімізації; розв'язок диференціальних рівнянь в звичайних похідних тощо.

Різноманітність числових методів зумовлена різними підходами до знаходження компромісу між суперечливими вимогами універсальності, точності, надійності і обчислювальних витрат, які висувають до методів. Для розв'язування конкретної практичної задачі необхідно вибрати з усього різноманіття методи, найбільш відповідні, які задовольняють заданій точності.

При вирішенні кількох однотипних завдань різної складності керуються також вимогами універсальності і надійності.

Вибір числових методів і побудова з них послідовного логічного ланцюжка для розв'язування конкретного завдання є стратегією числових методів.

Метод скінченних різниць

В даний час при числову розв'язуванні багатьох задач фізики і техніки, описуваних рівняннями математичної фізики, використовується метод скінченних різниць. Метод скінченних різниць є найстарішим методом розв'язання крайових задач.

Суть методу скінченних різниць полягає в апроксимації шуканої безперервної функції сукупністю наближених значень, розрахованих в деяких точках області - вузлах. Сукупність вузлів, з'єднаних певним чином, утворює сітку. Сітка, в свою чергу, є дискретної моделлю області визначення шуканої функції. Застосування методу скінченних різниць дозволяє звести диференціальну крайову задачу до системи нелінійних в загальному випадку алгебраїчних рівнянь щодо невідомих вузлових значень функцій.

Метод скінченних елементів

Метод скінченних елементів є числовим методом розв'язку диференціальних рівнянь фізики і техніки.

Основна ідея методу скінченних елементів полягає в тому, що будь-яку безперервну величину, таку, як температура, тиск і переміщення, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується з безлічі кусково-неперервних функцій, визначених за допомогою значень неперервної величини у кінцевій кількості точок даної області.

У загальному випадку безперервна величина заздалегідь невідома і потрібно визначити значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області. Дискретну модель, проте, дуже легко побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній точці області відомі. Після цього можна перейти до загального випадку.

Отже, при побудові дискретної моделі безперервної величини надходять у такий спосіб: у області фіксується кінцеве число точок, ці точки називаються вузлами.

Значення безперервної величини в кожній вузловій точці вважається змінною, яка повинна бути визначена. Область визначення безперервної величини розбивається на кінцеве число підобластей, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області.

Безперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини. Для кожного елемента визначається свій поліном, але поліноми підбираються таким чином, щоб зберігалася безперервність величини уздовж границь елемента.

Переваги і недоліки методу скінченних елементів

Область застосування методу скінченних елементів надзвичайно широка і охоплює всі фізичні завдання, які можуть бути описані диференціальними рівняннями. Найбільш важливими перевагами методу скінченних елементів, завдяки яким він широко використовується, є наступні:

- Властивості матеріалів суміжних елементів можуть бути різними, що дозволяє застосовувати метод для тіл, складених з декількох матеріалів.
- Криволінійна область може бути апроксимована за допомогою прямолінійних елементів або описана точно за допомогою криволінійних елементів. Таким чином, методом можна використовувати не тільки для областей з «нормальною» формою границь.
- Розміри елементів можуть бути змінними. Це дозволяє збільшити або зменшити сітку розбиття області на елементи, якщо в цьому є необхідність.
- В методі скінченних елементів не має проблем при задаванні різних типів граничних умов: статичних, кінематичних або змішаних.

Зазначені вище переваги методу скінченних елементів можуть бути використані при складанні узагальненої програми для розв'язку задач певного класу.

Факторами, які перешкоджають розширенню кола завдань, які вирішують методом скінченних елементів, є обмеженість машинної пам'яті і висока вартість обчислювальних робіт.

Порівняння методу скінченних різниць та методу скінченних елементів

Обидва методи відносяться до класу сіткових методів наближеного розв'язання крайових задач. З точки зору теоретичних оцінок точності методи мають приблизно однакові можливості. Залежно від форми області, крайових умов, коефіцієнтів вихідного рівняння обидва методи мають похибки апроксимації від першого до четвертого порядку щодо кроку. Внаслідок цього вони успішно використовуються для розробки програмних комплексів автоматизованого проектування технічних об'єктів.

Методи скінченних елементів і скінченних різниць мають ряд суттєвих відмінностей. Перш за все, методи різні в тому, що в методі скінченних різниць апроксимуються похідні шуканих функцій, а в методі скінченних елементів - самі функції розв'язку, тобто залежність шуканих функцій від просторових координат і часу.

Методи значно відрізняються і в способі побудови сіток. У методі скінченних різниць будуються, як правило, регулярні сітки, особливості геометрії області враховуються тільки в приграничних вузлах. У зв'язку з цим метод скінченних різниць частіше застосовують для аналізу завдань з прямолінійними границями областей визначення функцій.

До традиційних задач, які вирішують методом скінченних різниць, відносяться дослідження течій рідин і газів в трубах, каналах з урахуванням теплообмінних процесів тощо.

У методі скінченних елементів розбиття на елементи проводиться з урахуванням геометричних особливостей області, процес розбиття починається від границь з метою найкращої апроксимації її геометрії. Потім розбивають на елементи внутрішні області, причому алгоритм розбиття будується так, щоб елементи задовольняли деяким обмеженням, наприклад сторони трикутників мало відрізнялись за довжиною. Тому метод скінченних елементів найбільш часто використовується для розв'язку завдань з довільною областю визначення функцій, таких, як розрахунок на міцність деталей і вузлів будівельних конструкцій, авіаційних і космічних апаратів, теплові розрахунки.

Серед числових методів при вирішенні задач про напружено-деформований стан широкого застосування набув МСЕ [32], заснований на припущенні, що тіло можна представити у вигляді набору елементів, з'єднаних один з одним тільки у вузлах. Зв'язок вузлових зусиль з вузовими переміщеннями задається за допомогою матриці жорсткості елемента. Об'єднання матриць жорсткості окремих елементів в глобальну матрицю жорсткості тіла дозволяє записати умови рівноваги тіла. При заданих навантаженнях або переміщеннях розв'язок системи рівнянь рівноваги дозволяє знайти всі вузлові зусилля, а по них – напруження і переміщення в межах кожного елемента.

В останні роки широко застосовують скінченно-елементні обчислювальні комплекси ABAQUS, ANSYS, SYSWELD, SIMUFACT WELDING та інші, які дозволяють моделювати різні процеси, в тому числі і термодеоформаційні, які відбуваються під час зварювання.

У зв'язку з цим, розробка і числова реалізація нових ефективних моделей процесу зварювання рухомим джерелом нагрівання з урахуванням жорсткості зварного вузла, технологічних схем виконання зварних швів, форми і розмірів зварних швів сприятимуть більш ефективному і обґрунтованому розв'язку задач механіки твердого тіла і подальшому розвитку методів розрахунку НДС зварних конструкцій з урахуванням впливу температури на термомеханічні властивості матеріалу, виду напруженого стану та тривалості нагріву.

Висновки до розділу 1

1. На сьогоднішній день МСЕ є одним з основних, доступних і точних методів для оцінки напруженого стану. Скінченно-елементний аналіз дозволяє визначати зварювальні та конструктивні напруження шляхом моделювання конструкції об'ємними скінченними елементами з підбраною сіткою. Такий аналіз дозволяє отримувати значення параметрів НДС і величини ККН з урахуванням конструктивних параметрів зварного шва.
2. Аналіз впливу НДС на міцність зварної конструкції і вузлів показав, що наявність такого фактору, як ККН в місцях зварних з'єднань, вимагає визначення його величини, ще на стадії проектування з метою зменшення його величини.
3. Концентрація напружень зумовлена, в першу чергу, формою зварних швів і найбільше проявляється у кутових зварних швах таврових і хрестоподібних з'єднань у порівнянні зі стиковими з'єднаннями.
4. Відомі на сьогоднішній день розрахункові залежності для визначення ККН в хрестових зварних з'єднаннях, з деякою мірою вірогідності, мають задовільну точність, однак їх застосування пов'язане з обмеженнями, обумовленими конструктивними особливостями, і які вимагають ретельного аналізу умов експлуатації конструкції та геометрії шва в кожному конкретному випадку.

РОЗДІЛ 2 Числове моделювання залишкового напружено-деформованого стану хрестових зварних з'єднань

2.1 Методика скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану хрестового зварного з'єднання

Оскільки умови нагрівання й охолодження зварного виробу визначають кінетику структурних перетворень, характер розподілу і рівень внутрішніх напружень і деформацій, а теплофізичні і механічні властивості матеріалу залежать від температури і структури, то параметри напружено-деформованого стану залежить від розв'язку зв'язаної задачі термопружнопластичності.

Сучасні підходи по математичному моделюванню процесів зварювання для розв'язку термомеханічної задачі передбачають застосування об'ємних моделей джерел нагріву. Найбільш досконалою на даний момент вважається модель розподіленого об'ємного джерела нагріву, яку запропонував J.Goldak [33]. В аналітичній моделі J.Goldak задає нормальний (за Гаусом) розподіл щільності потужності джерела нагрівання в об'ємі тіла, який має форму подвійного еліпсоїда (рис. 2.1).

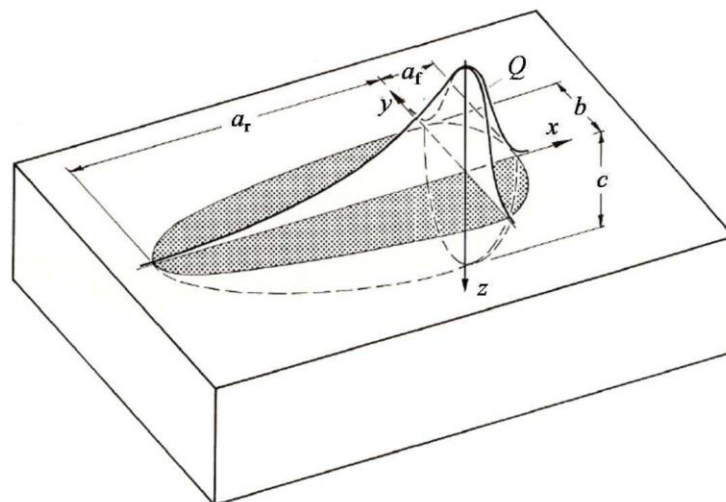


Рисунок 2.1 - Модель об'ємного зварювального джерела нагріву за J.Goldak

В даному випадку, як і для інших розподілених об'ємних джерел тепла, температурне поле $T(x, y, z, t)$ задовольняє диференційному нелінійному рівнянню теплопровідності в будь-якій точці тіла:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{vol}, \quad (2.1)$$

де $q_{vol}(x, y, z)$ – об'ємна щільність теплової потужності джерела, Вт/см³. Характерною особливістю моделі є те, що розподіл об'ємної щільності потужності джерела задається незалежно для фронтальної (індекс f) і хвостової (індекс r) чвертей еліпсоїда:

$$q_{vol,f} = f_f \frac{6\sqrt{3Q}}{a_f b c \pi^{3/2}} e^{-3 \left[\left(\frac{x+v(\tau-t)}{a_f} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right]}$$

$$q_{vol,r} = f_r \frac{6\sqrt{3Q}}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{-3 \left[\left(\frac{x+v(\tau-t)}{a_r} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right]}$$

де Q – ефективна тепла потужність джерела нагрівання (для дугового зварювання $Q = \eta IU$), τ – час, що минув від початку дії джерела; t – поточний час; v – швидкість переміщення джерела (швидкість зварювання); x, y, z – напівосі еліпсоїда за координатними напрямками ОХ, ОУ, ОZ; f_f і f_r – коефіцієнти, які визначають співвідношення для тепла, введенного у фронтальну і хвостову частину еліпсоїда; a_f, a_r, b, c – відповідні радіуси нормального розподілу.

За даними [33] між коефіцієнтами f_f і f_r існує наступне співвідношення:

$$f_f = \frac{2a_f}{a_f + a_r}; f_r = \frac{2a_r}{a_f + a_r}; f_f + f_r = 2$$

Автор моделі рекомендує для загальних випадків дугового зварювання призначати: $f_f = 0,4$ і $f_r = 1,6$.

Для опису умов теплообміну використані граничні умови третього роду [34]:

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = h [T_c(\tau) - T_n(\tau)], \quad (2.2)$$

де n – нормаль до поверхні; h – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, який враховує теплообмін конвекцією і випромінюванням; T_c і T_n – температура навколишнього середовища і поверхні відповідно. Індекс « n » відноситься до значень на поверхні.

Крайова задача (2.1) – (2.2) проінтегрована при початковій умові:

$$T(x, y, z) = T_0, \quad (2.3)$$

де T_0 - початкова температура.

Розв'язок задачі теплопровідності з використанням МСЕ зводиться до мінімізації функціоналу, який описує крайову задачу (2.1) – (2.3). Для групи скінченних елементів це призводить до наступного матричного рівняння [32]:

$$[C] \frac{\{T\}}{\partial \tau} + [K] \{T\} = \{F\},$$

де $[C]$, $[K]$ – глобальні матриці теплоємності і теплопровідності; $\{T\}$ – вектор-стовпець температур у вузлах скінченно-елементної сітки; $\{F\}$ – вектор-стовпець теплового навантаження в вузлах.

Поведінка матеріалу зварного вузла в процесі деформування відповідає білінійній моделі пластичності з ізотропним зміцненням. Перехід металу з

пружного стану у пластичний визначається критерієм пластичності Мізеса з асоційованим законом текучості:

$$F(\sigma, \chi, \sigma_T(T)) = f(\sigma - \chi) - \sigma_T(T) \geq 0, \quad (2.4)$$

де $\sigma_T(T)$ – межа текучості матеріалу в залежності від температури; σ – тензор напружень; χ – напрямний тензор.

Загальний вид закону пластичного деформування такий:

$$\varepsilon_n = \lambda \frac{\partial \tau^2}{\partial S_{i,j}}, \quad (2.5)$$

де λ – скалярна величина; $\partial \tau^2$ – приріст інтенсивності девіатора напружень; $\partial S_{i,j}$ – девіатор напружень.

Для моделювання процесу зварювання і визначення параметрів НДС зварного вузла використовували розроблений на основі MCE [32] програмний комплекс Simufact Welding 6.0.

Скінченно-елементний аналіз хрестового зварного вузла протикумулятивного екрану виконується у два етапи.

На першому етапі створюємо геометричну модель вузла з наступним її розбиттям на скінченно-елементну сітку зі згущенням у зоні зварювання і в межах зони термічного впливу (по 15 мм з кожної сторони від майбутньої лінії сплавлення). Для виконання цього етапу використовуємо програмний комплекс «Visual Mesh 10.7».

При цьому на довжині змодельованої зварювальної ванни повинно бути не менше чотирьох елементів, тому елементи сітки в зоні згущення мають розміри 1x1x1 мм, а за її межами сітка нерегулярна з розмірами елементів 1,5...3,5 мм для зменшення витрат часу на розрахунки. Загальна кількість вузлів моделі становить 24 866.

На другому етапі виконуємо моделювання процесу зварювання вузла: для комбінацій досліджуваних матеріалів (основний метал, електродний дріт) задаємо параметри режиму дугового зварювання у захисному газі, параметри зварювальної ванни і послідовність виконання зварних швів, а також граничні умови – закріплення.

Зварний вузол є частиною протикумулятивного екрану і складається з двох пластин з габаритними розмірами: «Stenka 1» - 80x40x4 мм та «Stenka 2» - 280x40x4 мм. Складання пластин між собою виконувалось «в зуб» (рис. 2.2).

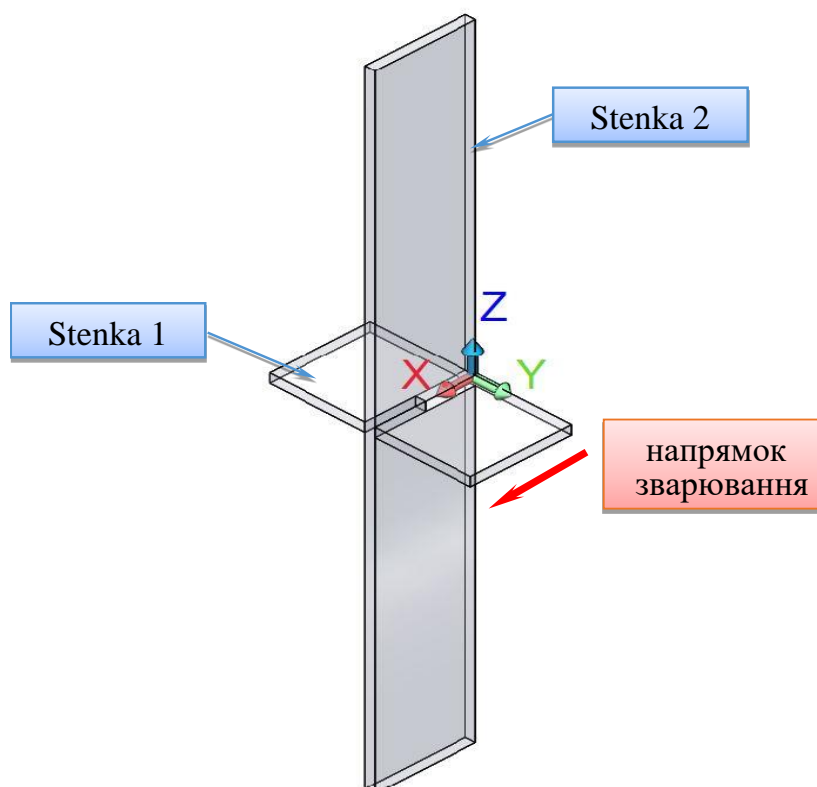


Рисунок 2.2 – Пластини, складені «в зуб» для зварювання кутових швів

Скінченно-елементна модель зварного вузла комірки захисного екрану створена за допомогою твердотільного моделювання і представляє собою хрестове з'єднання двох пластин з габаритними розмірами 80x40x4 мм і 280x40x4 мм складених «в зуб», зварених чотирма поздовжніми кутовими швами з катетом 4 мм.

Граничні умови, які імітують його зв'язок з усією конструкцією протикумулятивного екрану задаємо через параметр жорсткості (Н/мм),

попередньо обчислений, як вплив одиничної сили на переміщення торців пластини завширшки 80 мм вздовж осі Z, а пластини заввишки 280 мм вздовж осі Y і перерахований програмним комплексом для всієї моделі в цілому (рис. 2.3). Система координат зорієнтована таким чином, що вісь X напрямлена вздовж зварних швів (додатній напрямок співпадає з напрямком зварювання), вісь Y – поперек зварних швів (вздовж пластини завширшки 80 мм), вісь Z – вертикальна (вздовж пластини заввишки 280 мм). Початок системи координат співпадає з проекцією центра ваги зварних швів і відповідає початку зварювання.

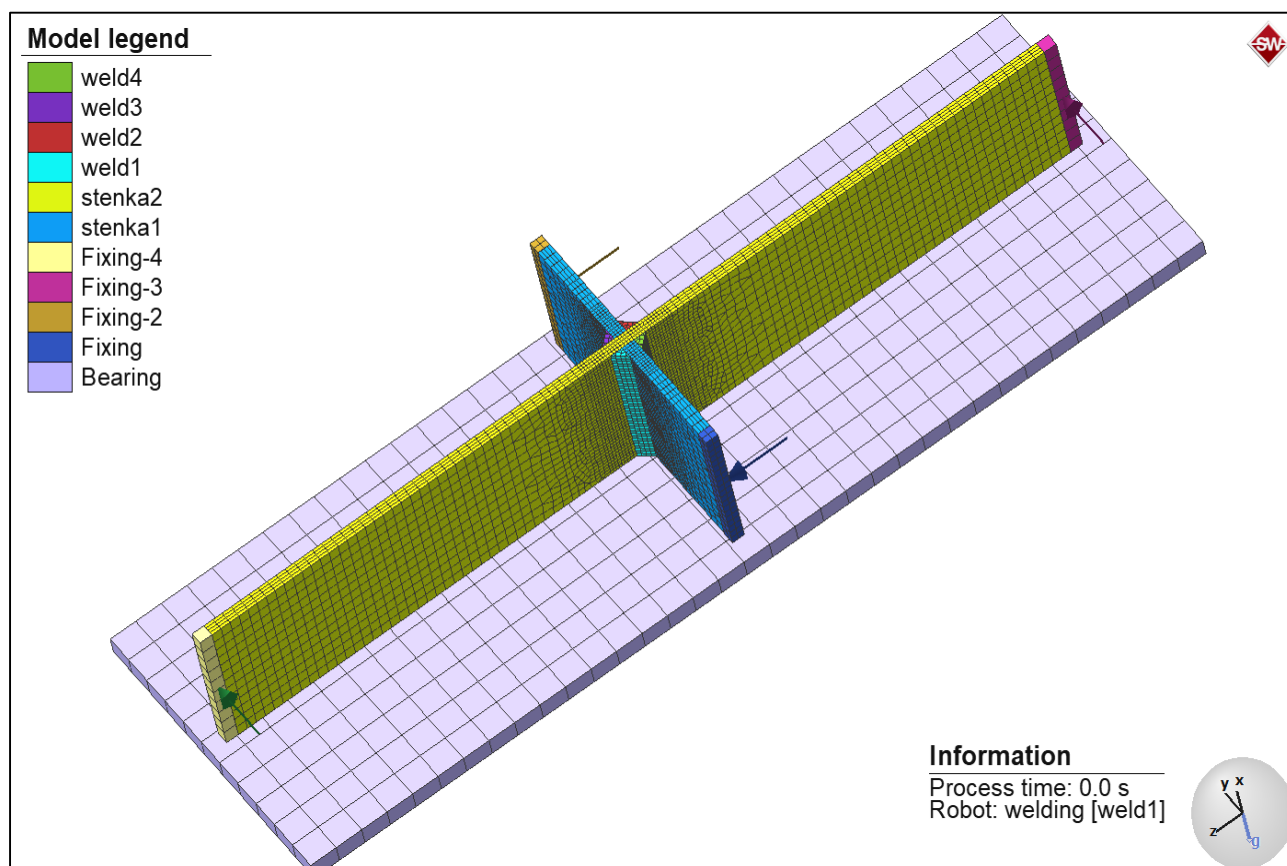


Рисунок 2.3 – Скінченно-елемента модель вузла з граничними умовами

Моделювання напружено-деформованого стану зварного вузла виконували для трьох комбінацій конструкційних матеріалів пластин і зварювальних дротів: сталь Ст3сп і дріт Св-08Г2С; сталь 09Г2С і дріт Св-08Г2С та 30ХГСА і дріт Св-08Х20Н9Г7Т.

Механічні властивості і хімічний склад основного металу і зварювальних дротів наведені у табл. 2.1-2.4.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей

Вміст елементів, мас. %	30ХГСА [35]	Ст3сп [36]	09Г2С [37]
C	0,34	0,14...0,22	0,12
Mn	-	0,40...0,65	0,5...0,8
Si	-	0,05...0,15	1,3...1,7
B	1,1	-	-
Nb	1,2	-	-
Cr	-	-	≤ 0,3
Ni	-	-	≤ 0,3
W	1,1	-	1,1
Ti	0,3	-	-
Cu	0,3	-	≤ 0,3
V	0,025	-	-
N	-	0,01	-
P	0,025	0,040	0,030
S	-	0,050	0,035

Таблиця 2.2 – Хімічний склад наплавленого металу

Вміст елементів, мас. %	СВ-08Г2С [38]	СВ-08Х20Н9Г7Т [39]
C	0,07	0,081
Mn	1,3	7,1
Si	0,7	0,68
Cr	0,007	18,86
Ni	0,006	9,1
Mo	0,007	-
Cu	0,22	-
Ti	-	0,88
P	0,012	0,018
S	0,013	0,014

Таблиця 2.3 – Механічні властивості сталей

Марка сталі	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
30ХГСА [35]	835	1080	10
Ст3сп [36]	235	360 - 490	25
09Г2С (клас міцності: 440) [37]	440	590	19

Таблиця 2.4 – Механічні властивості наплавленого металу

Марка дроту	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
Св-08Г2С [38]	470	570	27
Св-08Х20Н9Г7Т [39]	460	650	41

Погонну енергію зварювання задавали у програмному комплексі Simufact Welding вибором типу джерела тепла та послідовним введенням значень струму, напруги, коефіцієнту корисної дії процесу зварювання та швидкості зварювання (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Параметри режиму зварювання кутових швів зварного вузла

Зварювальний струм $I_{зв}$, А	Напруга на дузі $U_{зв}$, В	Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/сек	ККД
120	22	4	0,6

Згідно обраної моделі рухомого джерела тепла для дугового зварювання плавленням, вводили геометричні параметри зварювальної ванни (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Геометричні параметри зварювальної ванни

Ширина, мм	Довжина, мм	Глибина проплавлення, мм
5	8	2

Зварювання чотирьох кутових швів виконували послідовно за схемою «навхрест» (рис. 2.4) на погонній енергії 396 Дж/мм.

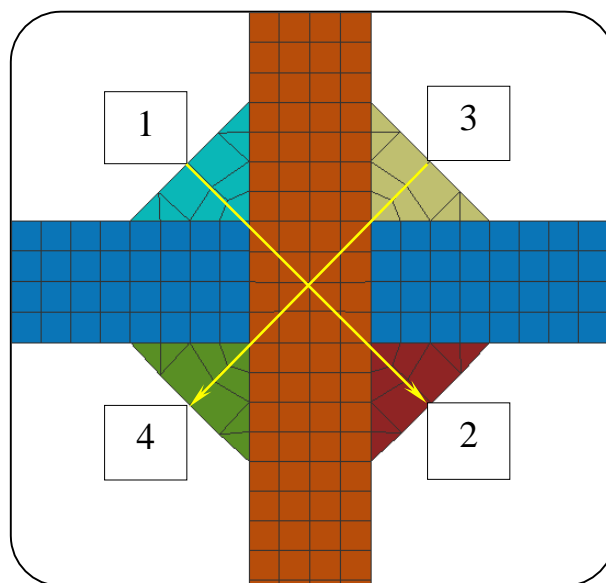


Рисунок 2.4 – Схема виконання зварних кутових швів

Налаштування послідовності зварювання швів задається часом початку зварювання кожного наступного шва і призначенням траєкторії зварювання. Зварювання одного шва завдовжки 40 мм зі швидкістю 4 мм/с виконується за 10 с. Таким чином, початком зварювання швів від першого до четвертого є 0, 10, 20 та 30 секунди.

В результаті розв'язання нелінійної зв'язаної задачі термо-пружно-пластичності від зварювання поздовжніх швів визначений рівень залишкових максимальних еквівалентних пластичних деформацій і еквівалентних напружень, визначені максимальні і мінімальні значення компонентів тензора напружень, виконаний аналіз параметрів напружено-деформованого стану зварного вузла для різних комбінацій сполучення марок основного металу і зварювальних дротів з метою визначення оптимального варіанту виготовлення протикумулятивного екрану. Результати представлені у наступному пункті.

2.2 Аналіз параметрів залишкового напружено-деформованого стану для досліджуваних конструкційних матеріалів

Аналіз залишкового НДС доцільно розпочати з розподілу залишкових еквівалентних пластичних деформацій, оскільки їх нерівномірний розподіл у поперечному перерізі зварного вузла є основним фактором, що спричиняє утворення залишкових напружень.

Розглянемо по чергово розподіл залишкових еквівалентних пластичних деформацій і еквівалентних напружень у пластинах «Stenka 1» і «Stenka 2»

Залишкові еквівалентні пластичні деформації у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 1»

Як видно з рис. 2.5, для всіх досліджуваних конструкційних матеріалів утворились значні (більші за границю текучості для деформацій для кожної сталі: $11,7 \cdot 10^{-4}$ - межею текучості для СтЗсп, $22 \cdot 10^{-4}$ – для 09Г2С і $41,7 \cdot 10^{-4}$ – умовна межа текучості для сталі 30ХГСА) за величиною еквівалентні пластичні деформації зосереджені в межах $-5 \dots +5$ мм від центра ваги зварних швів (надалі центральна точка перерізу), що можна пояснити досить високою температурою нагріву металу, яка перевищувала 600°C в цій зоні.

Характер розподілу деформацій для трьох сталей однаковий за винятком центральної точки перерізу. Для СтЗсп маємо незначне підвищення до 0,0689 рівня пластичних деформацій від характерних для сталей 30ХГСА (0,0466) і 09Г2С (0,038) мінімумів, що пояснюється кращою здатністю до пластичного деформування СтЗсп на відміну від сталей 30ХГСА і 09Г2С.

Загалом зниження рівня пластичних деформацій в центральній точці перерізу найбільш вірогідно зумовлене геометричними особливостями моделі зварного вузла. Цій точці відповідає місце з'єднання двох пластин «в зуб», що спричиняє податливість контакту пластин в процесі зварювання і, як наслідок, зменшення рівня залишкових пластичних деформацій.

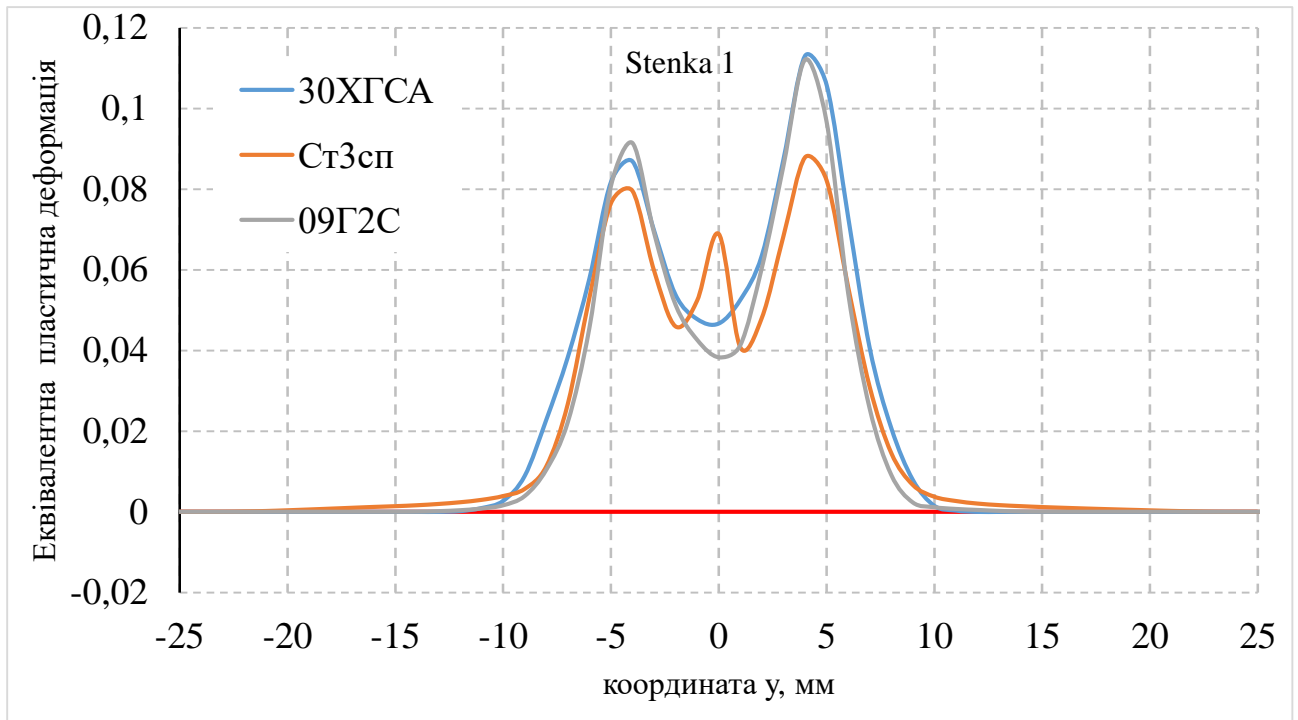


Рисунок 2.5 – Розподіл еквівалентних залишкових пластичних деформацій за Мізесом у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 1»

Розподіл пластичних деформацій має асиметричний характер: максимум розташований праворуч ($y=4$ мм) від центральної точки і становить 0,1129 для сталі 30ХГСА, 0,1121 – для 09Г2С і 0,0878 – для сталі Ст3сп, що зумовлено поступовим підвищенням жорсткості зварного вузла в процесі виконання чотирьох зварних швів – «навхрест» (рис.2.4) і, як наслідок, підвищенням рівня еквівалентних пластичних деформацій.

Границі зон пластичних деформацій обмежені розмірами -25...+25 мм для сталі Ст3сп; -15...+15 мм - для 09Г2С та -13...+13 мм для сталі 30ХГСА, що пояснюється більшими значеннями межі текучості: 835 МПа для сталі 30ХГСА, 440 МПа – для 09Г2С порівняно з 235 МПа для Ст3сп.

Залишкові еквівалентні напруження у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 1»

На рис. 2.6 показаний розподіл залишкових еквівалентних напружень у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 1».

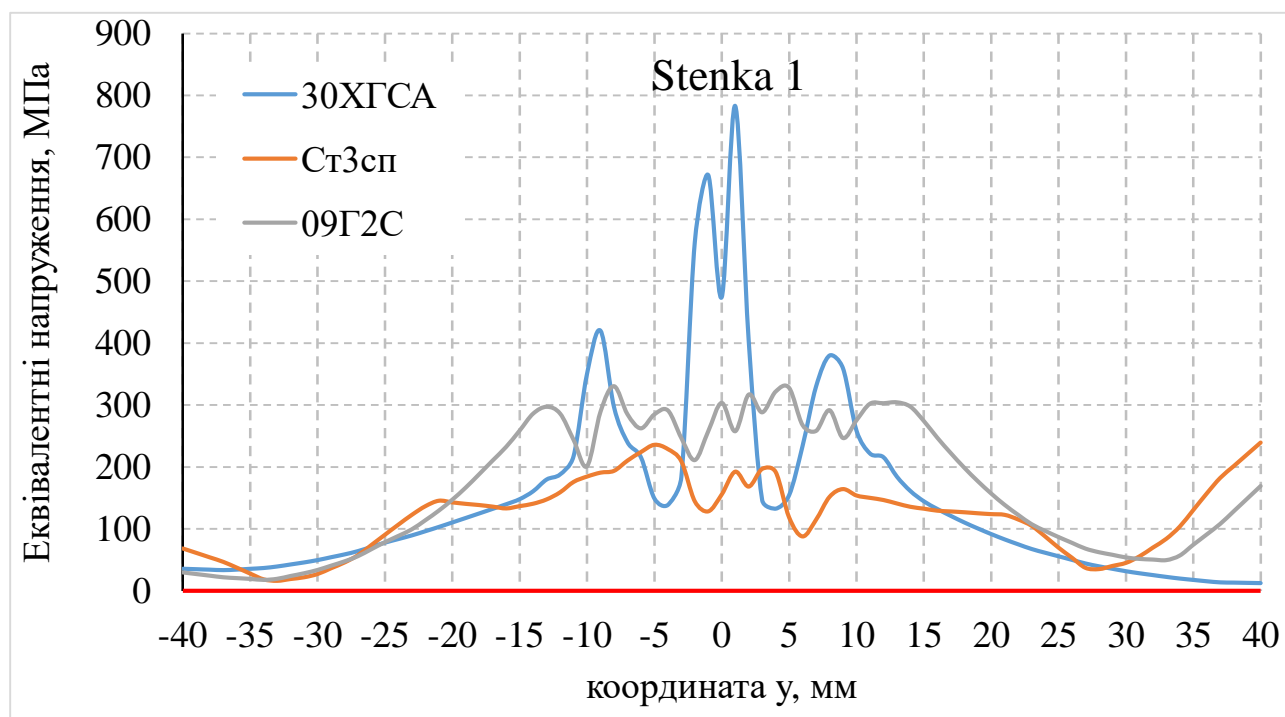


Рисунок 2.6 – Розподіл еквівалентних залишкових напружень за Мізесом у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 1»

Як видно з рис. 2.6, характер еквівалентних напружень у досліджуваних сталях різний.

Для сталі **30ХГСА** розподіл еквівалентних напружень на площині контакту складених «в зуб» двох пластин на інтервалі $-2...+2$ мм має високоградієнтний характер і коливається в межах від 563 МПа до 404 МПа з максимальними значеннями 672 МПа і 782 МПа на інтервалі $-1...+1$ мм від центральної точки перерізу.

На границях ЗТВ ліворуч (-10 мм) і праворуч ($+10$ мм) від центральної точки еквівалентні напруження становлять 420 МПа і 380 МПа – для 30ХГСА з подальшим поступовим зниженням до 62 МПа на лівому торці пластини і до 12

МПа – на правому, що зумовлено зміною жорсткості зварного вузла в процесі зварювання кутових швів і результатом дії на торцях пластини закріплень, які спричиняють вигин пластини «Stenka 2» з площини ZX, а також переміщення правої частини пластини «Stenka 1» праворуч, тим самим зменшуючи рівень напружень на правому торці.

Для сталі СтЗсп рівень еквівалентних напружень на площині контакту двох пластин (в межах $-2...+2$ мм) також має нерівномірний характер від 144 МПа у точці $y = -2$ мм до 168 МПа у точці $y = +2$ мм зі значенням 155 МПа у центральній точці. Максимум еквівалентних напружень – 235 МПа знаходиться у точці з координатою $y = -5$ мм, яка відповідає границі зони сплавлення 1-го і 4-го заварених швів. Надалі рівень напружень зменшується до мінімальних значень ~ 16 МПа ліворуч ($y = -33$ мм) і ~ 35 МПа – праворуч ($y = +35$ мм) від центральної точки перерізу, але знову зростає на торцях: ліворуч до ~ 68 МПа і праворуч до ~ 239 МПа, що можна пояснити двома причинами: 1) закріплення торців пластини такі, що дозволені переміщення тільки вздовж осі Z; 2) внаслідок неодночасного і асиметричного заварювання швів в результаті дії позацентрово прикладеної усадкової сили після заварювання 4-ох швів утвориться прогин лівої частини пластини вниз з площини (вздовж осі Z), тим самим зумовлюючи підвищення напружень до зазначених величин.

Для сталі 09Г2С рівень еквівалентних напружень у площині контакту двох пластин (в межах $-2...+2$ мм) також має складний характер розподілу від ~ 211 МПа у точці $y = -2$ мм до ~ 317 МПа у точці $y = +2$ мм зі значенням ~ 304 МПа у центрі. Максимум еквівалентних напружень – ~ 331 МПа знаходиться у точці з координатою $y = -8$ мм, яка відповідає області зони сплавлення 1-го і 4-го заварених швів. Надалі рівень напружень зменшується до мінімальних значень ~ 20 МПа ліворуч ($y = -33$ мм) і ~ 50 МПа – праворуч ($y = +33$ мм) від центральної точки перерізу, але знову зростає на торцях: ліворуч до ~ 30 МПа і праворуч до ~ 170 МПа, що можна пояснити двома причинами: 1) поперечною усадкою металу швів, в результаті якої виникає розтяг пластини вздовж осі Y з одночасними утворенням кутових переміщень, а так як граничні умови для

торців пластини «Stenka 1» імітують жорстке закріплення та не дозволяють переміщення вздовж осі Y на торцях пластини підвищуються напруження; 2) внаслідок фазових перетворень та неодночасного і заварювання швів навхрест в результаті дії позацентрово прикладеної усадкової сили після заварювання 4-ох швів утворився прогин пластини «Stenka 2» ліворуч вздовж осі Y , що і зумовило підвищення рівня напружень до вказаних величин.

Залишкові еквівалентні пластичні деформації у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 2»

На рис. 2.7 показаний розподіл еквівалентних залишкових пластичних деформацій у середньому поперечному в площині XZ перерізі пластини «Stenka 2».

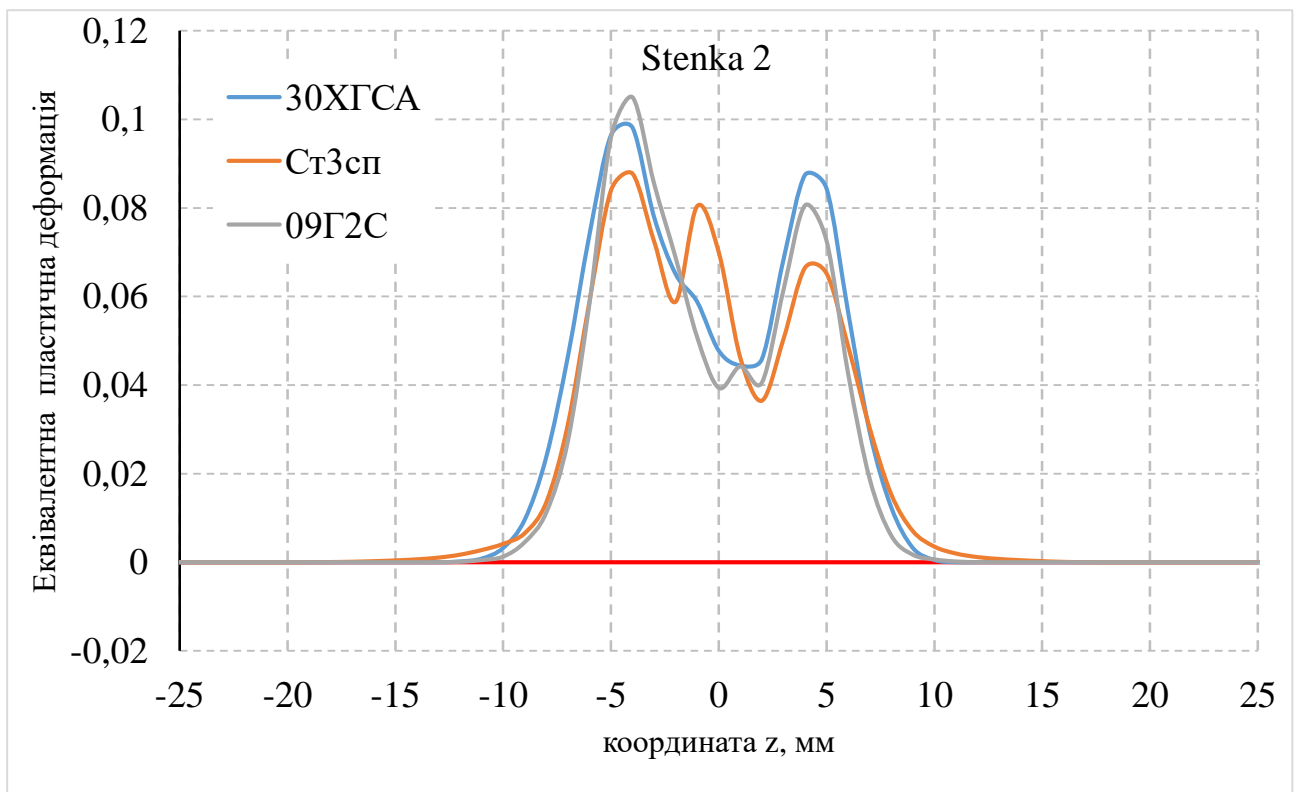


Рисунок 2.7 – Еквівалентні залишкові пластичні деформації за Мізесом у середньому поперечному (у площині XZ) перерізі пластини «Stenka 2»

Як видно з рис. 2.7, для пластини «Stenka 2» також характерні більші за границю текучості для деформацій ($11,7 \cdot 10^{-4}$ для СтЗсп, $22 \cdot 10^{-4}$ для 09Г2С і $41,7 \cdot 10^{-4}$ – для 30ХГСА) за величиною еквівалентні пластичні деформації, які зосереджені в межах $-5 \dots +5$ мм від центральної точки перерізу, що пояснюється високою температурою нагріву металу, яка перевищувала 600°C у цій зоні.

Характери розподілу деформацій для трьох сталей подібні один до одного за винятком центральної точки перерізу: для СтЗсп маємо незначне підвищення до 0,0804 рівня пластичних деформацій від характерних для 09Г2С (0,0394) і для 30ХГСА (0,0477) мінімумів, що пояснюється кращою здатністю до пластичного деформування СтЗсп на відміну від 30ХГСА і 09Г2С. Причина зменшення рівня пластичних деформацій в центральній точці перерізу, вірогідно, зумовлена геометричними особливостями моделі зварного вузла – цій точці відповідає місце з'єднання двох пластин «в зуб», що спричиняє податливість контакту пластин і, як наслідок, зменшення рівня пластичних деформацій.

Розподіл пластичних деформацій в межах $-10 \dots +10$ мм аналогічний до розподілу у пластині «Stenka 1», але має віддзеркалений асиметричний характер: максимум розташований ліворуч від центральної точки і становить 0,1050 – для 09Г2С; 0,0981 – для 30ХГСА і 0,0877 – для СтЗсп, що зумовлено поступовим підвищенням жорсткості зварного вузла в процесі виконання чотирьох зварних швів – «навхрест» і, як наслідок, підвищенням рівня еквівалентних пластичних деформацій.

Границі зон пластичних деформацій у пластині «Stenka 2» обмежені розмірами $-20 \dots +24$ мм для СтЗсп, $-14 \dots +13$ мм – для 09Г2С і для 30ХГСА – $-13 \dots +11$ мм і майже не змінились у порівнянні з пластиною «Stenka 1».

Залишкові еквівалентні напруження у середньому поперечному перерізі пластини «Stenka 2»

На рис. 2.8 для середнього поперечного перерізу пластини «Stenka 2» показаний розподіл залишкових еквівалентних напружень, який для кожної сталі має власні характерні особливості .

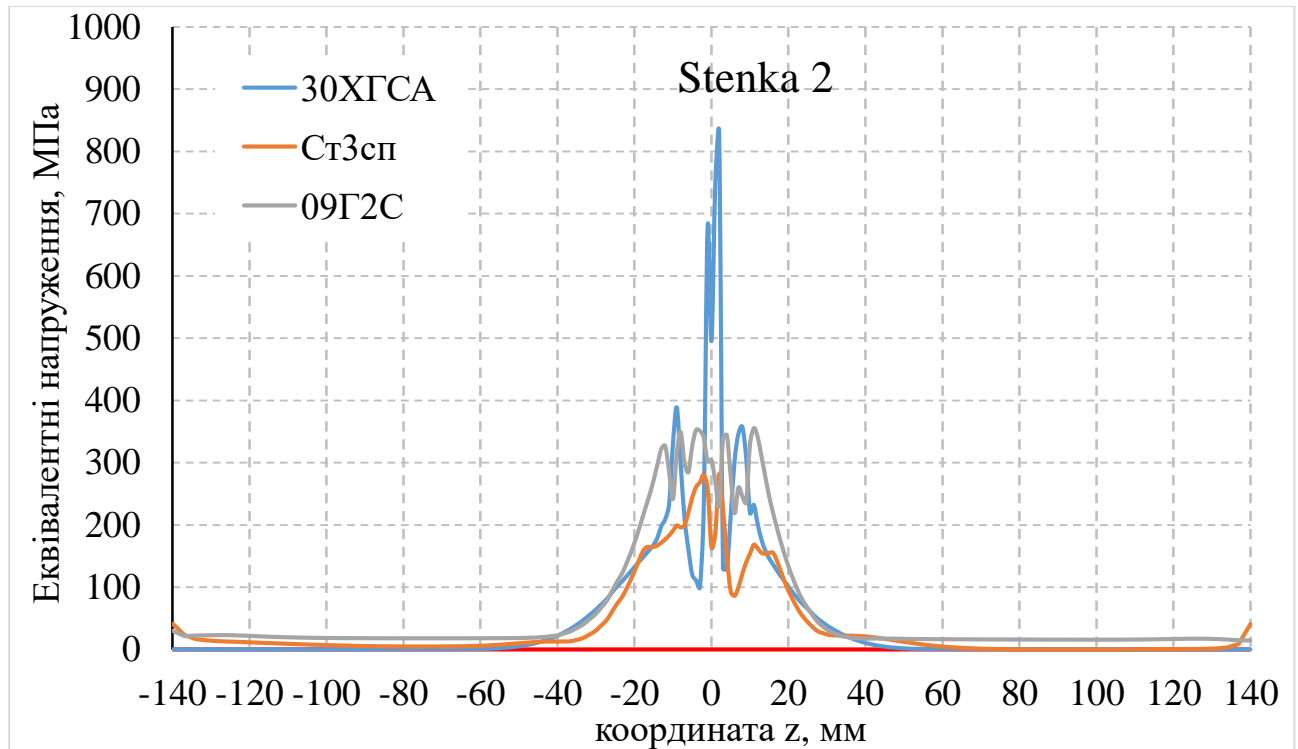


Рисунок 2.8 – Розподіл еквівалентних залишкових напружень за Мізесом у середньому поперечному (в площині XZ) перерізі пластини «Stenka 2»

Для сталі **30ХГСА** розподіл еквівалентних напружень на лінії контакту складених «в зуб» двох пластин (в межах $-2...+2$ мм) має нерівномірний характер і коливається в межах від ~ 227 до ~ 827 МПа з максимальними значеннями ~ 678 і ~ 749 МПа в межах $-1...+1$ мм від центральної точки перерізу.

На границях ЗТВ ліворуч (-9 мм) і праворуч ($+8$ мм) від центральної точки еквівалентні напруження становлять ~ 388 і ~ 357 МПа — для 30ХГСА з подальшим поступовим зменшенням майже до нульових значень на нижньому і верхньому торцях пластини, що зумовлено вигином пластини «Stenka 2» з

площини XZ, оскільки граничними умовами дозволені переміщення пластини «Stenka 2» вздовж осі Y.

Для сталі СтЗсп рівень еквівалентних напружень на лінії контакту двох пластин (в межах $-2 \dots +2$ мм) також має нерівномірний характер від ~ 281 МПа на $z = -2$ мм до ~ 282 МПа на $z = +2$ мм зі зниженим значенням ~ 164 МПа у центральній точці. Максимальні еквівалентні напруження ~ 282 МПа відповідають координатам -2 і $+2$ мм вздовж осі Z.

Надалі рівень напружень зменшується до значень $< \sim 10$ МПа вниз і вгору ($z = -140$ мм і $z = +140$ мм) від центральної точки перерізу, але знову симетрично зростає на торцях зверху і знизу до 40 МПа, що можна пояснити двома причинами: 1) таким закріплення торців пластини, які дозволяють переміщення тільки вздовж осі Y, і які виконують роль жорсткого закріплення вздовж осей Z та X; 2) внаслідок неодночасного і асиметричного заварювання швів в результаті дії позацентрово прикладеної усадкової сили після заварювання 4-ох швів утвориться прогин пластини «Stenka 2» праворуч з площини XZ (вздовж осі Y), тим самим зумовлюючи підвищення напружень до зазначених величин.

Для сталі 09Г2С найбільші напруження утворились в зоні контакту двох пластин зі сторони зварювання 1-го та 4-го швів і складають ~ 340 МПа на координаті $z = -2$ мм, а мінімальні ~ 230 МПа зі сторони зварювання 2-го і 3-го швів на координаті $z = +2$ мм. На границях зони пластичних деформацій $z = -2$ мм і $z = +11$ мм, напруження складають ~ 327 МПа та ~ 355 МПа відповідно, і які послідовно зменшуються до величин ~ 20 МПа з обох сторін пластини.

Отже, з аналізу графіків розподілу залишкових еквівалентних напружень в середніх поперечних перерізах (рис. 2.6, 2.8) можна зробити висновок про те, що характер розподілу залишкових напружень в межах $-10 \dots +10$ мм від центральної точки зварного вузла є вкрай нерівномірним для всіх трьох сталей, що зумовлено наявністю геометричних особливостей моделі зварного вузла.

Місце з'єднання двох пластин «в зуб» є конструктивною неоднорідністю, яка спричиняє локальне підвищення рівня напружень. Окрім цього необхідно брати до уваги фазові перетворення матеріалу під час нагрівання і охолодження

для сталей 09Г2С і 30ХГСА, що також спричиняє мікроструктурну неоднорідність і, відповідно, підвищення рівня залишкових напружень.

Найбільші за величиною еквівалентні напруження утворюються у середньому поперечному перерізі центральної частині зварного вузла у пластині «Stenka 2» і становлять 258..282 МПа для Ст3сп, 330...355 МПа – для 09Г2С і 783...827 МПа – для 30ХГСА, що майже відповідає рівню границі текучості матеріалів.

Аналіз графіків розподілу залишкових еквівалентних пластичних деформацій, показаних на рис. 2.5, 2.7, дозволяє зробити висновок про те, що розподіл пластичних деформацій має характерне зменшення у центральній точці поперечного зварного вузла, що можна пояснити геометричними особливостями моделі зварного вузла – цій точці відповідає місце з'єднання двох пластин «в зуб», і це спричиняє податливість контакту пластин під час зварювання і, як наслідок, зменшення рівня пластичних деформацій.

Ширина зон пластичних деформацій у пластині «Stenka 1» для Ст3сп у ~ 2 рази більша ніж для 30ХГСА і у ~1,67 рази більша ніж для 09Г2С і становить ~50 мм і ~26 мм і ~30 мм відповідно, що пояснюється різними міцнісними і теплофізичними характеристиками цих сталей, а отже і їх здатністю пластично деформуватись.

Розміри зони пластичних деформацій у пластині «Stenka 2» для всіх трьох сталей мають незначну асиметрію і мало відрізняються за величиною від розмірів пластичних зон для пластини «Stenka 1».

Для сталі Ст3сп ширина пластичної зони у ~1,83 рази більша ніж для 30ХГСА і у ~1,63 рази більша ніж для 09Г2С і становить ~44 мм і ~24 мм і ~27 мм відповідно, що пояснюється меншою жорсткістю пластини «Stenka 2» і різними міцнісними характеристиками цих сталей, а отже і їх здатністю пластично деформуватись.

Поля залишкових еквівалентних напружень у зварному вузлі зі сталі 30ХГСА

З розподілу еквівалентних напружень у зварному вузлі зі сталі 30ХГСА видно, що максимальні напруження дорівнюють ~ 1103 МПа, і є більшими за границю міцності 1080 МПа. Ці напруження зосереджені в прикореневій області першого шва на його початку (рис. 2.9). Крім того значні за величиною напруження - до ~ 880 МПа, що вище границі текучості (830 МПа) зосереджені в областях під швами, а також в області коренів швів на відстанях до 5 мм від їх початку та кінця і в зоні геометричної неоднорідності, обумовленою технологічною особливістю складання пластин для зварювання. При цьому в зварних швах величина напружень менша за ~ 425 МПа, що не перевищує границі міцності 650 МПа для металу, наплавленого дротом Св-08Х20Н9Г7Т. В областях прилеглих до зварного шва ($y=6\dots 12$ мм) величина напружень не перевищує 700 МПа і зменшується в межах від ~ 650 МПа на початку зварних швів до ~ 500 МПа в кінці. Такий самий розподіл напружень є характерним і для пластини «Stenka 2». За межами зони пластичних деформацій напруження поступово знижуються до ~ 10 МПа.

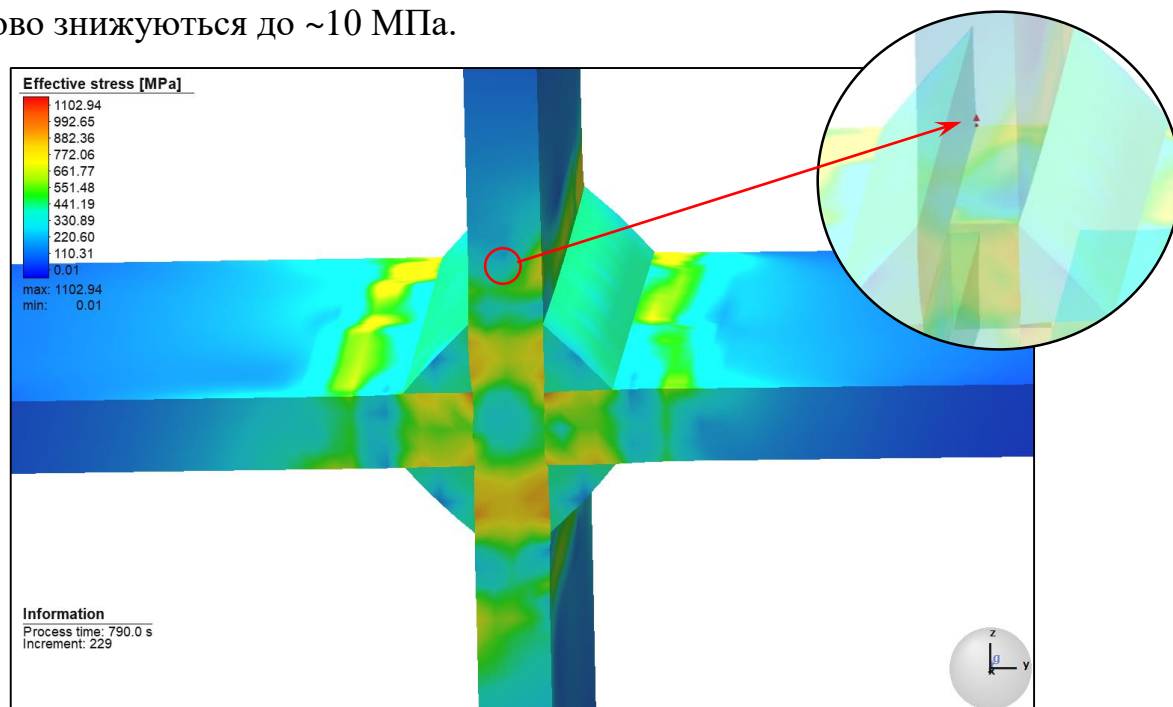


Рисунок 2.9 – Поля залишкових еквівалентних напружень
для зварного вузла зі сталі 30ХГСА

Поля залишкових еквівалентних напружень у зварному вузлі зі сталі СтЗсп

Максимальні залишкові еквівалентні напруження після зварювання вузла зі сталі СтЗсп не перевищують рівня ~ 457 МПа (рис. 2.10). Ці напруження діють у корені першого зварного шва на його кінці. Максимальні напруження не перевищують границі міцності металу зварного шва наплавленого дротом Св-08Г2С, яка дорівнює 570 МПа. В конструктивних елементах «Stenka 1» та «Stenka 2» максимальні напруження складають ~ 372 МПа та ~ 350 МПа відповідно, що нижче границі міцності основного металу (490 МПа).

Значні напруження на рівні 380...420 МПа діють в зонах прилеглих до прикореневиx областей, розташованих на кінці зварних швів.

З розподілу еквівалентних напружень видно, що для сталі СтЗсп, на відміну від 30ХГСА, значні напруження зосереджені в зварних швах та на їх поверхні. При цьому напруження всередині зварних швів досягають рівня ~ 360 МПа, а на їх поверхні величини ~ 310 МПа.

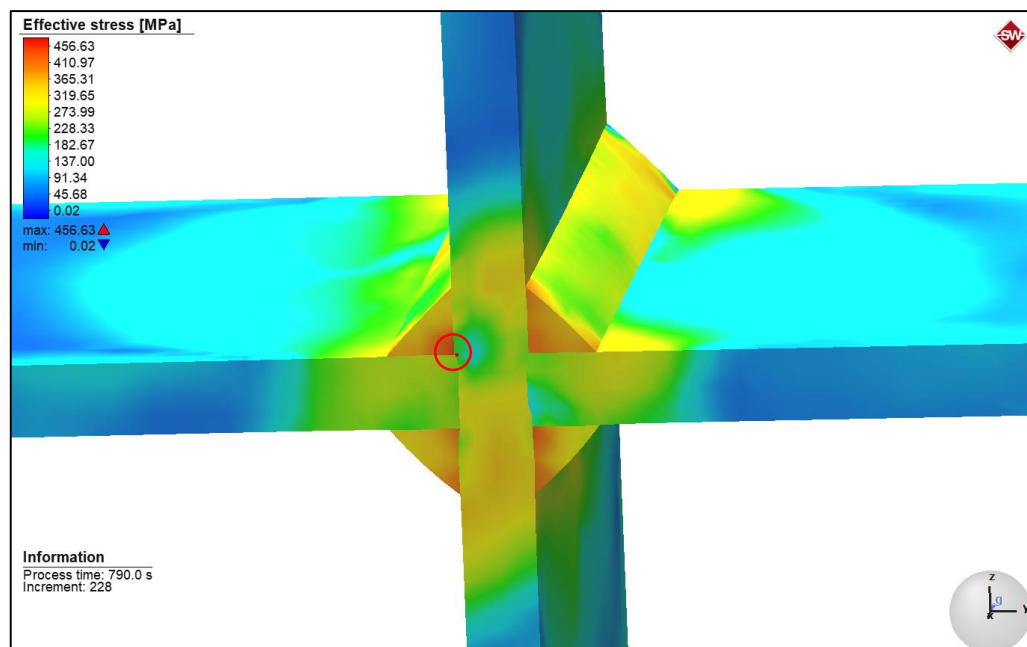


Рисунок 2.10 – Поля залишкових еквівалентних напруження
для зварного вузла зі сталі СтЗсп

Поля залишкових еквівалентних напружень у зварному вузлі зі сталі 09Г2С

Для хрестового зварного вузла, виконаного зі сталі 09Г2С, характерним є те, що значні за величиною еквівалентні напруження після зварювання чотирьох кутових швів зосереджені у прикореневій області першого зварного шва ($x=6...33$ мм), а їх максимальне значення складає ~ 700 МПа (більше за границю міцності сталі 09Г2С 590 МПа та границю міцності металу шва 570 МПа) на координаті $x=28$ мм від початку зварювання (рис 2.11). У центральній області зварного вузла напруження не перевищують значень $\sim 300... \sim 365$ МПа. У зварних швах величина напружень змінюється в діапазоні $\sim 140... \sim 570$ МПа. Напруження в пластинах біля лінії сплавлення та на відстані до 15 мм ліворуч і праворуч з кожної сторони складають $\sim 320... \sim 470$ МПа, і знижуються до величини ~ 50 МПа у реактивній зоні.

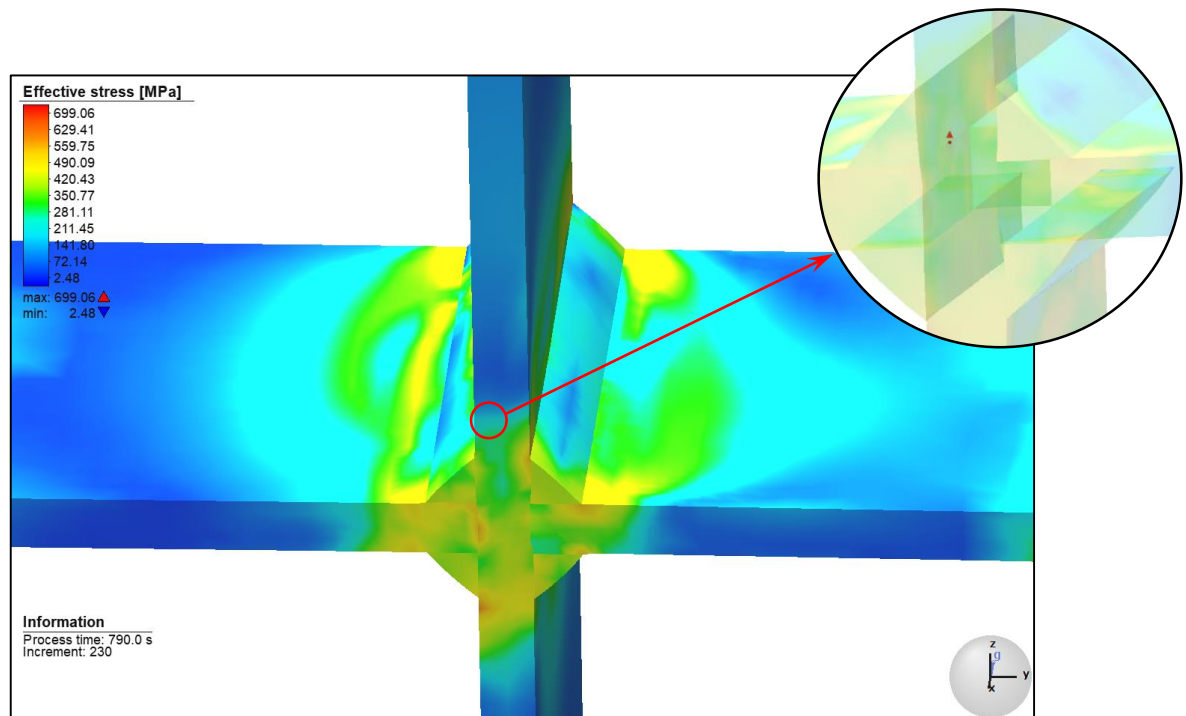


Рисунок 2.11 – Поля залишкових еквівалентних напружень
для зварного вузла зі сталі 09Г2С

Аналіз визначених величин еквівалентних напружень у зварному вузлі, для трьох різних сталей: 30ХГСА, Ст3сп та 09Г2С, свідчить про те, що максимальні напруження ~ 457 МПа, які виникають після зварювання хрестового вузла зі сталі Ст3сп, на 7% нижчі за границю міцності основного металу (490 МПа), та на 20% нижче за границю міцності металу зварного шва (570 МПа).

Для сталі 30ХГСА максимальні напруження досягають рівня ~ 1103 МПа, що більше за границі міцності основного металу ~ 1080 МПа на 2% і у 1,7 рази вище за границю міцності металу зварного шва (650 МПа).

При зварюванні хрестового з'єднання зі сталі 09Г2С максимальні еквівалентні напруження досягають значень ~ 700 МПа, що значно перевищує (на 18,6%) границю міцності основного металу (590 МПа) та на 23% більше границі міцності металу шва (570 МПа).

2.3 Визначення впливу технологічних схем виконання зварних швів на залишковий напружено-деформований стан

На основі розрахункових даних, отриманих МСЕ виконаний аналіз шести технологічних схем заварювання кутових швів хрестового зварного з'єднання. Схеми послідовностей зварювання представлені на рис. 2.12.

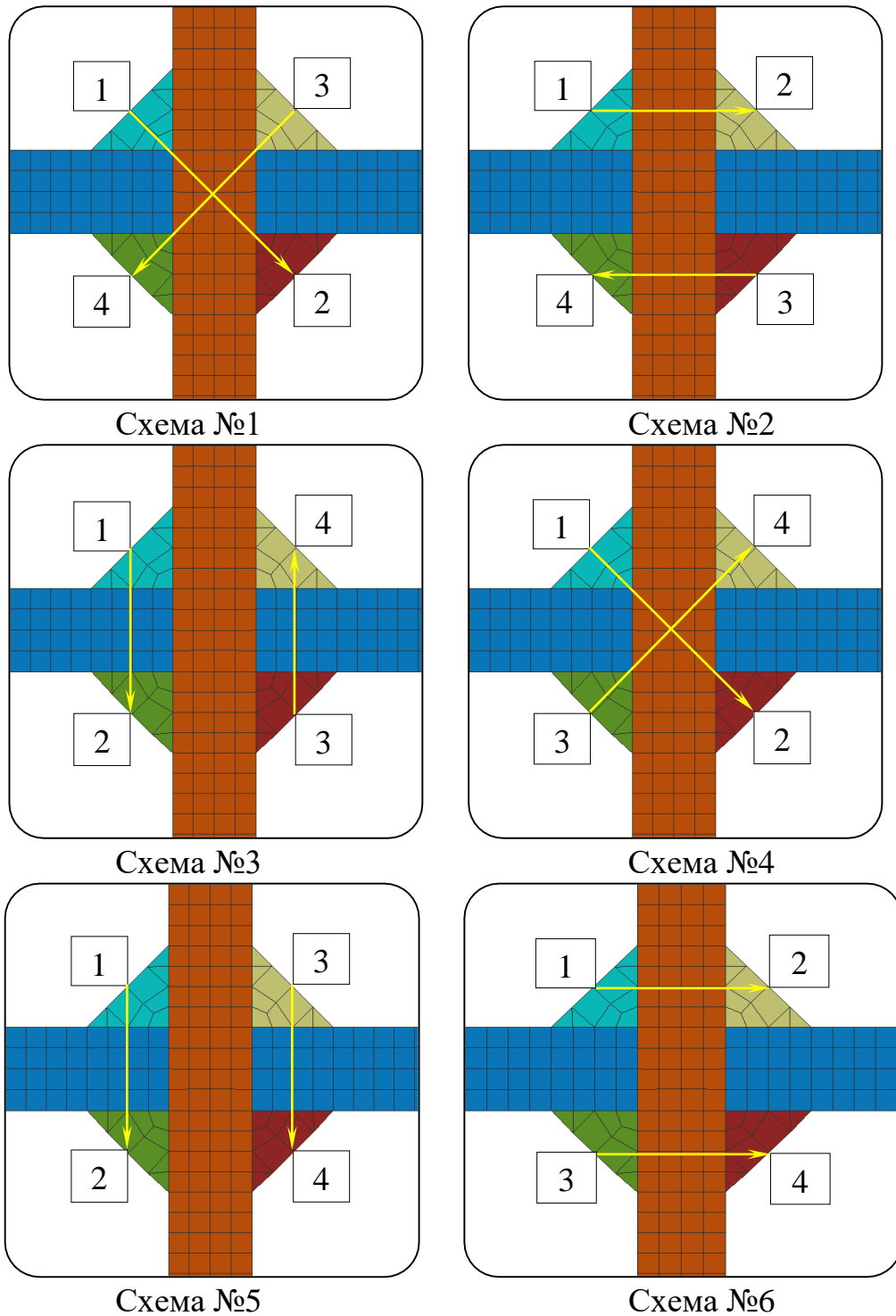


Рисунок 2.12 – Технологічні схеми виконання зварних кутових швів
у хрестовому зварному з'єднанні

Для аналізу впливу послідовності зварювання кутових швів на залишковий НДС хрестового зварного з'єднання, доцільно розглянути поля розподілу залишкових еквівалентних напружень у зварному вузлі з метою визначення величини максимальних напружень, які утворюються після зварювання за кожної із схем. Необхідним також є визначення переміщень конструктивних елементів зварного вузла, які призводять до зміни форми комірки захисного екрану, оскільки від цього залежить її здатність виконувати захисні функції. Визначення переміщень за різними схемами зварювання дозволить обрати таку послідовність зварювання, для якої зміна геометричних розмірів елементів зварної конструкції буде мінімальною.

На характер переміщень зварного вузла впливають задані граничні умови на торцях пластин, які імітують зв'язок зварного вузла зі зварною конструкцією. Оскільки елементи зварного вузла – це сталеві пластини завтовшки 4 мм, вони мають велику осьову жорсткість, що майже не дозволяє деформуватися в напрямку їх довжини, а дозволяє вигинатися в перпендикулярному напрямку. Таким чином для пластини «Stenka 1» дозволені переміщення в напрямку осі Z, а для пластини «Stenka 2» - вздовж осі Y.

Аналіз технологічної послідовності зварювання №1

Після зварювання чотирьох швів за схемою №1 залишкові максимальні еквівалентні напруження дорівнюють ~ 457 МПа і діють у корені першого зварного шва на його кінці ($x=+40$ мм) (рис. 2.13).

Аналіз переміщень після зварювання за схемою №1 показав (рис. 2.14), що точки пластини «Stenka 2» переміщуються вздовж осі Y таким чином, що утворюється вигин, зумовлений дією позацентровано прикладеної усадкової сили від зварювання 2-го та 3-го швів, розташованих праворуч від центра ваги зварного вузла. Переміщення, які утворились внаслідок зварювання трьох попередніх швів не компенсуються після зварювання 4-го шва. Максимальні переміщення після зварювання складають 0,81 мм.

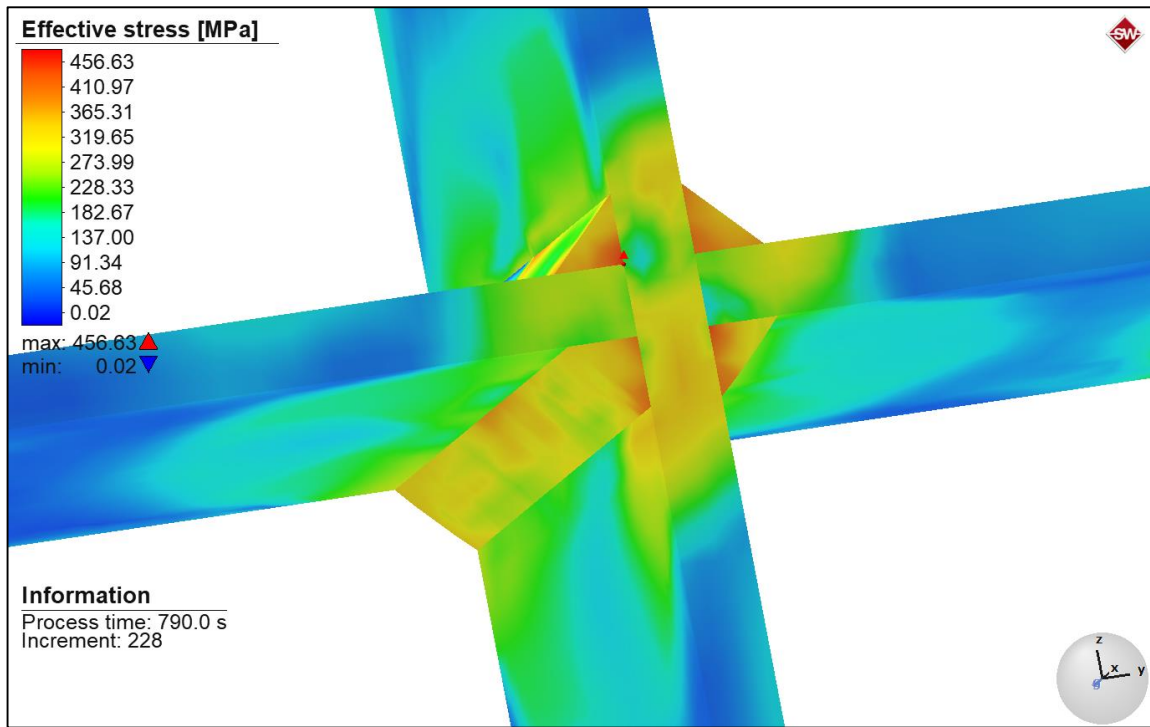


Рисунок 2.13 – Поля залишкових еквівалентних напружень за Мізесом для технологічної схеми №1

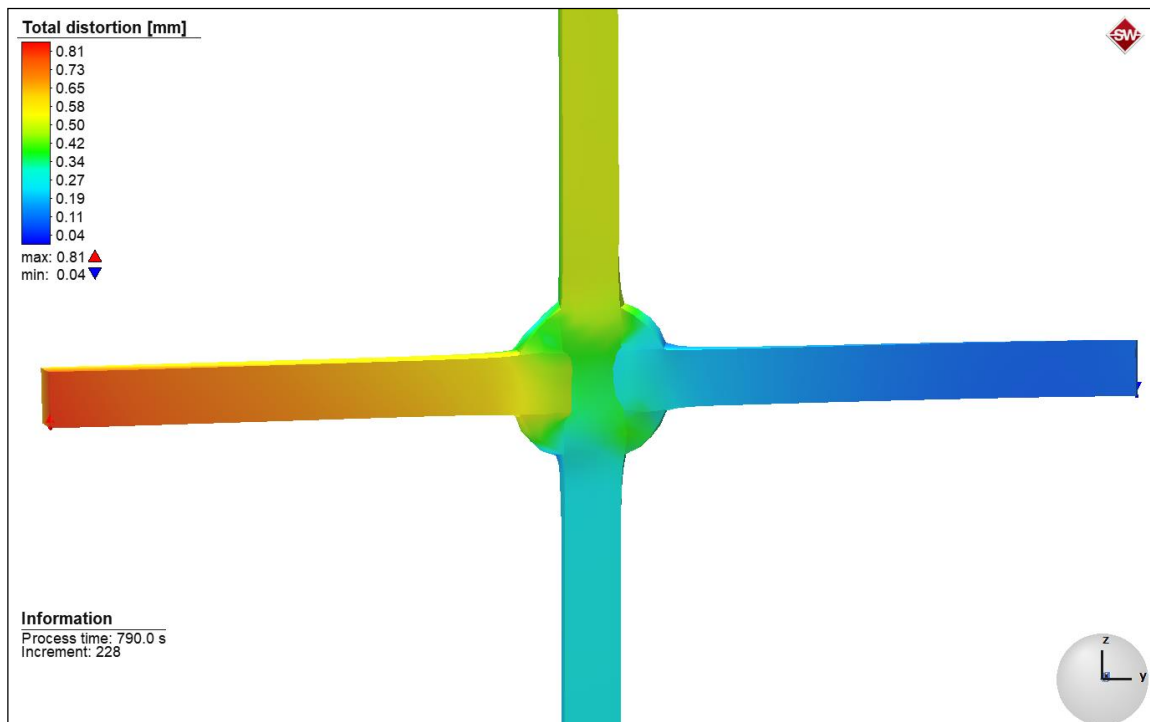


Рисунок 2.14 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №1

Аналіз технологічної послідовності зварювання №2

При зварюванні швів за схемою №2, коли шви заварюються послідовно за годинниковою стрілкою, максимальна величина залишкових еквівалентних напружень складає ~454 МПа. Найбільші напруження, так само як і для схеми №1 діють у кінці першого зварного шва (координата $x=+40$ мм), у його корені (рис. 2.15).

Розподіл переміщень після зварювання за схемою №2 має характер аналогічний до схеми №1 (рис. 2.16). Після зварювання виникає вигин пластини «Stenka 2» в напрямку осі Y, викликаний зварюванням 2-го та 3-го швів з протилежної сторони від першого шва. Вигин в напрямку осі Y пояснюється граничними умовами встановленими для пластини «Stenka 2», які дозволяють переміщення пластини в цьому напрямку. Максимальні переміщення після зварювання складають 1,12 мм.

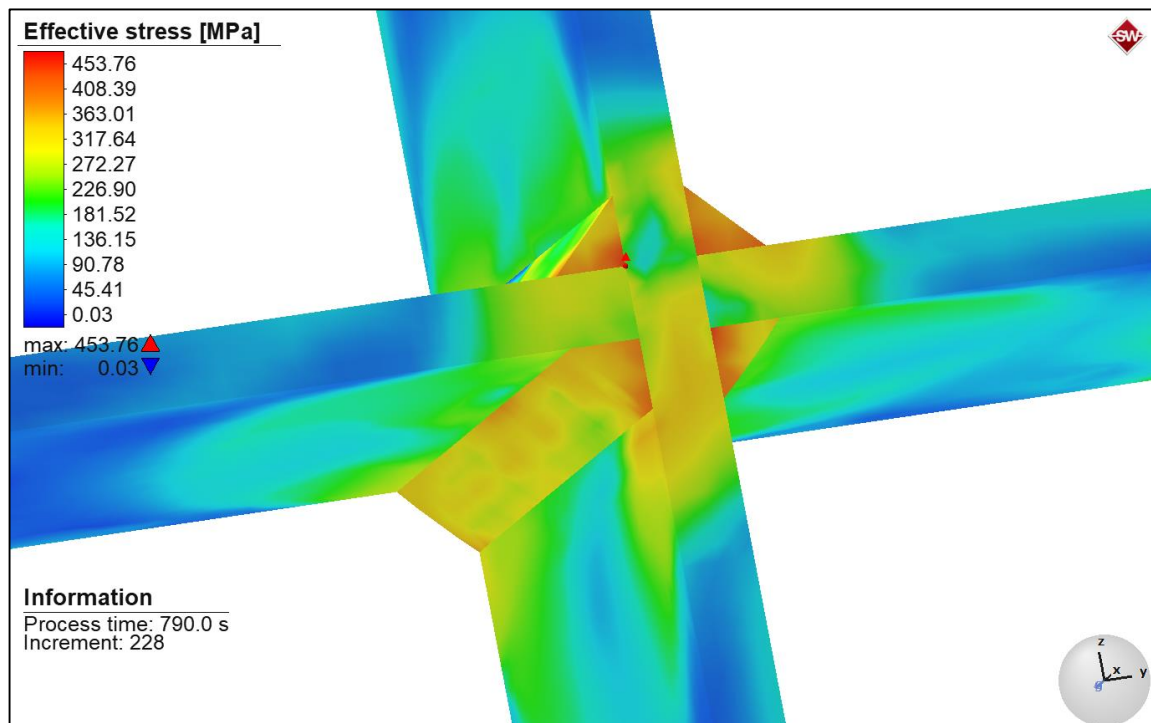


Рисунок 2.15 – Розподіл полів залишкових еквівалентних напружень за Мізесом при зварюванні за технологічною схемою №2

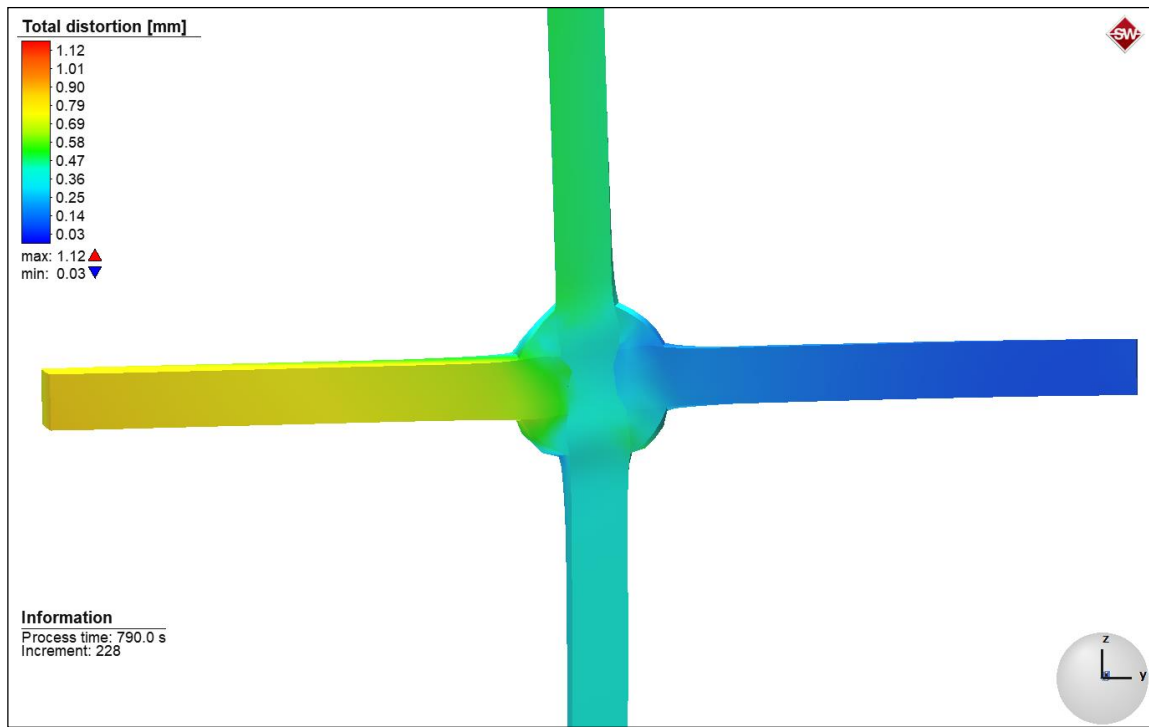


Рисунок 2.16 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №2

Аналіз технологічної послідовності зварювання №3

Для зварювання за схемою №3, коли зварні шви зварювалися послідовно проти годинникової стрілки, максимальні значення напружень склали ~448 МПа. Ці напруження діють в корені третього зварного шва у прикінцевій області (рис. 2.17).

За технологічною схемою зварювання №3, усадкова сила від зварювання перших двох швів спричиняє переміщення зварного вузла у від'ємному напрямку осі Y; зварювання 3-го та 4-го швів викликає переміщення вузла в протилежному до перших двох швів напрямку (рис. 2.18). Оскільки пластина «Stenka 1» має високу осьову жорсткість в напрямку осі Y, а переміщення дозволені тільки в напрямку осі Z, усадкова сила не спричиняє великих переміщень, а вигин пластина «Stenka 2», викликаний зварюванням перших двох швів, в значній мірі компенсується зварюванням 3-го та 4-го швів з протилежної сторони.

Максимальні переміщення для схеми №3 складають 0,53 мм.

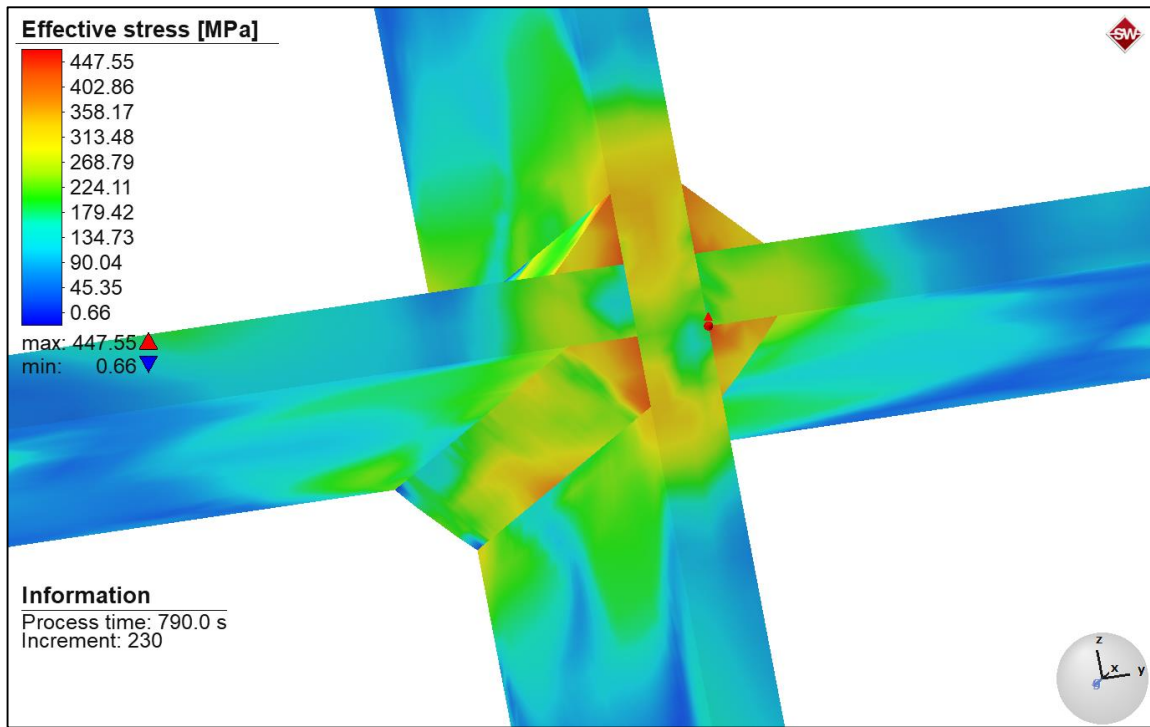


Рисунок 2.17 - Розподіл полів залишкових еквівалентних напружень за Мізесом при зварюванні за технологічною схемою №3

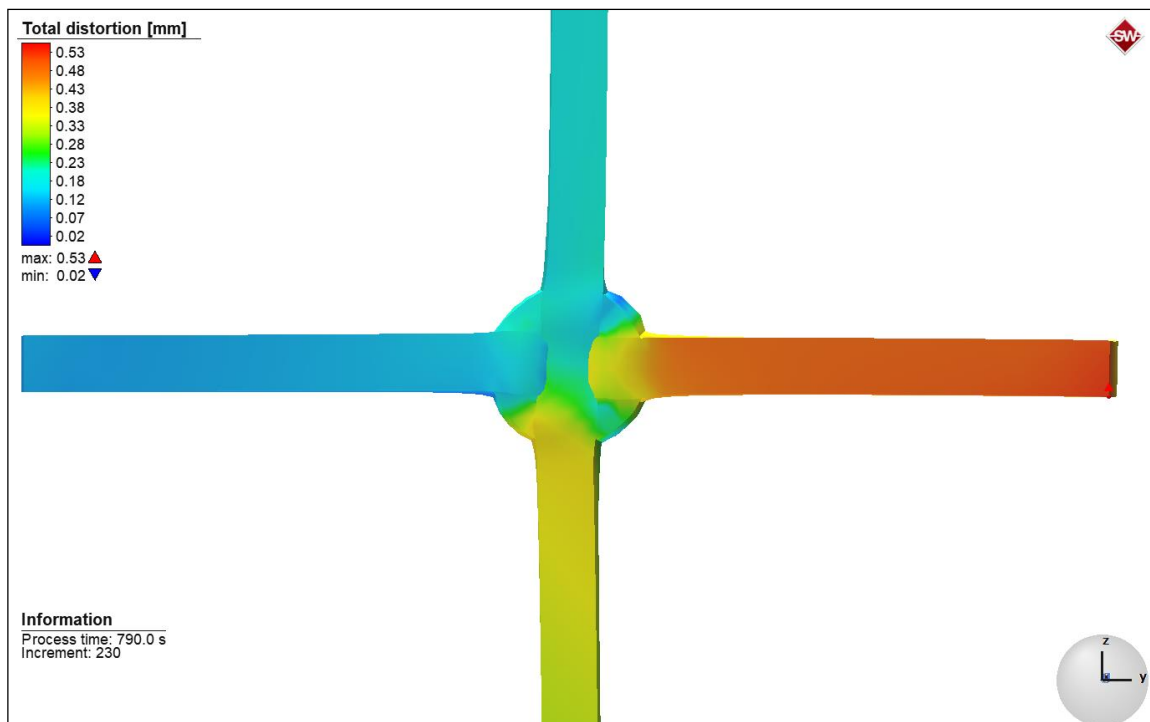


Рисунок 2.18 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №3

Аналіз технологічної послідовності зварювання №4

При зварюванні нахрест, за схемою №4, максимальні за величиною залишкові еквівалентні зварювальні напруження ~ 467 МПа діють в корені першого зварного шва в кінці зварювання (рис. 2.19).

Переміщення при зварюванні за схемою №4, (коли 2-ий шов зварюється нахрест до 1-го, а 4-ий до 3-го), як показано на рис. 2.20 досягають величини 0,88 мм і мають місце у пластині «Stenka 2».

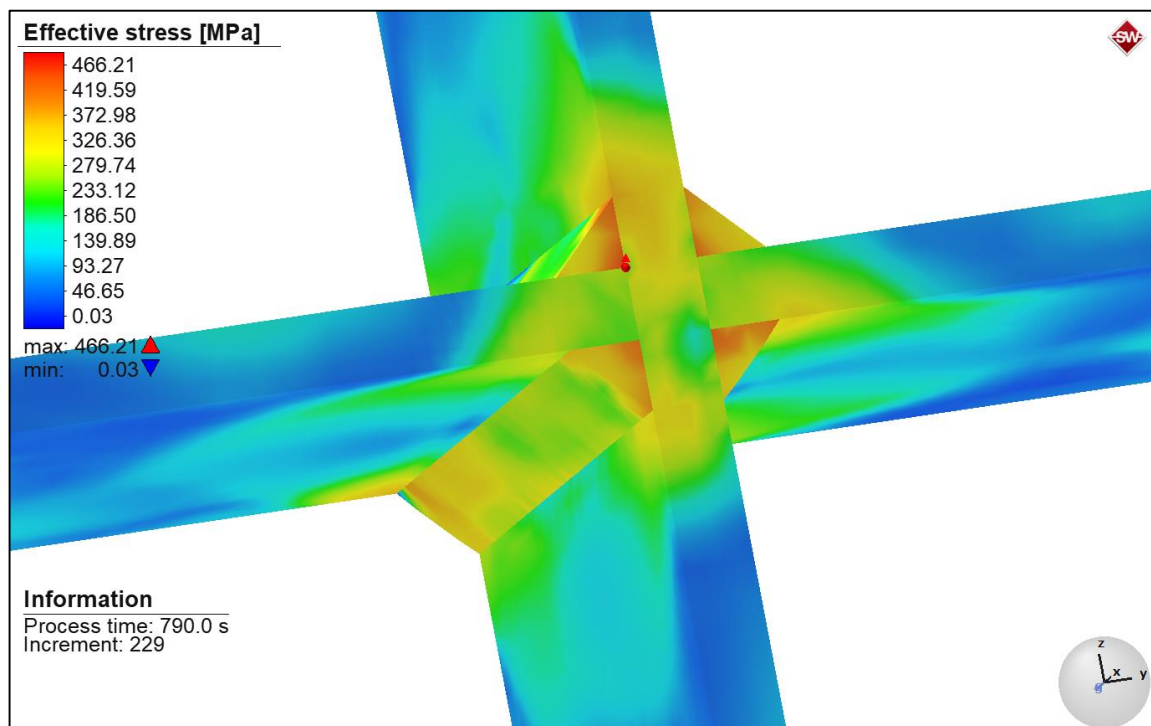


Рисунок 2.19 – Поля залишкових еквівалентних напружень за Мізесом при зварюванні за технологічною схемою №4

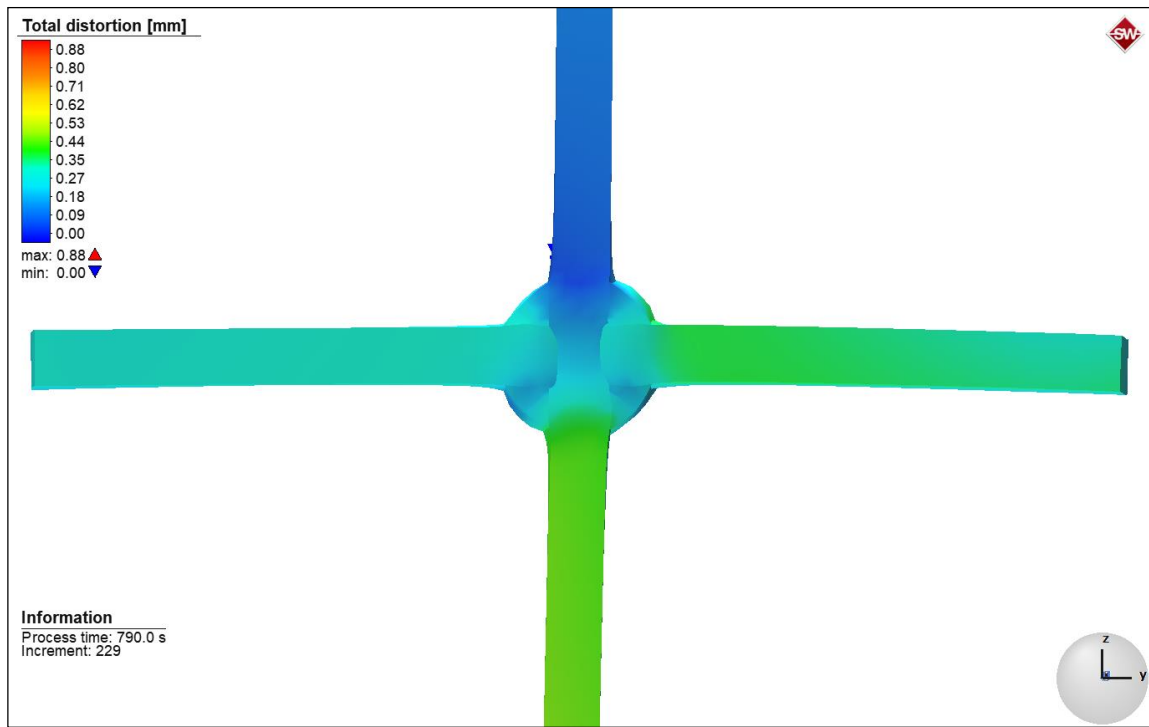


Рисунок 2.20 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №4

Аналіз технологічної послідовності зварювання №5

Під час зварювання за схемою №5, шви заварювалися вздовж пластини «Stenka 2» у напрямку зверху-вниз, спочатку ліворуч, а потім праворуч відносно осі Z. При цьому максимальні напруження сформувалися в корені першого шва на координаті $x=+40$ мм. Величина максимальних напружень складає ~ 460 МПа (рис. 2.21).

В результаті зварювання за схемою №5 відбувається вигин пластини «Stenka 2» з площини XZ внаслідок дії усадкової сили від перших двох заварених швів, який на відміну від зварювання за схемою №3 не компенсується, оскільки усадкова сила від 3-го зварного шва створює додатковий вигин вузла у від'ємному напрямку осі Y (рис. 2.22). Максимальні переміщення після зварювання за схемою №5 складають 1,18 мм і мають місце у нижній частині пластини «Stenka 2».

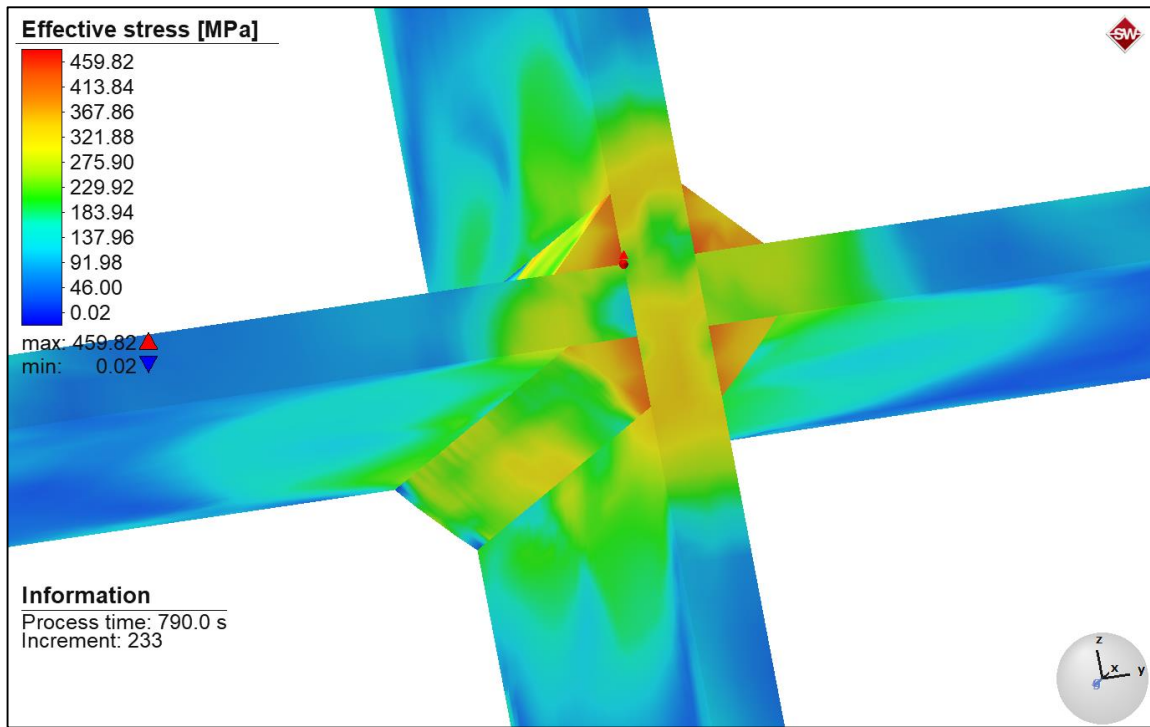


Рисунок 2.21 – Розподіл полів залишкових еквівалентних напружень за Мізесом при зварюванні за технологічною схемою №5

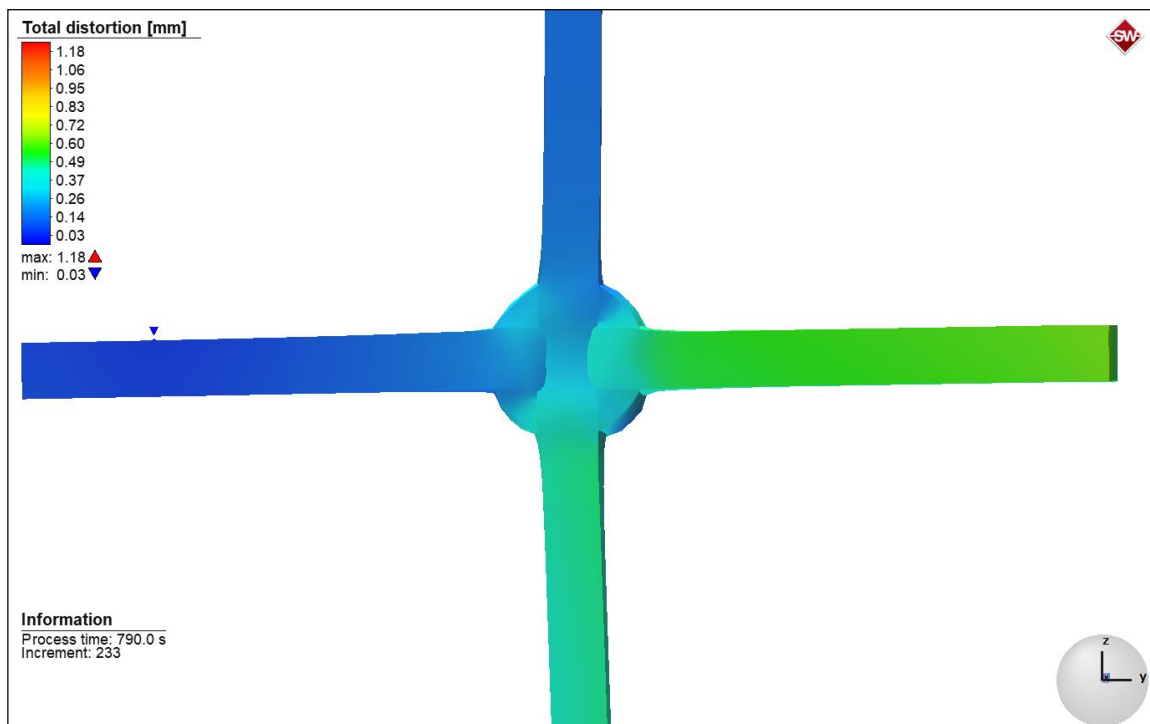


Рисунок 2.22 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №5

Аналіз технологічної послідовності зварювання №6

Зварювання за схемою №6 призводить до утворення у зварному вузлі максимальних еквівалентних напружень величиною ~ 455 МПа в місці переходу від основного металу до металу 2-го шва (рис. 2.23).

Зварювання за схемою №6 призводить до того, що під дією результуючої усадкової сили від зварювання всіх швів, пластина «Stenka 1» отримує деформації вигину вздовж від'ємного напрямку осі Z, а пластина «Stenka 2» —, вздовж від'ємного напрямку осі Y (рис. 2.24). Максимальні переміщення після зварювання за схемою №6 складають 1,05 мм у верхній частині пластини «Stenka 2».

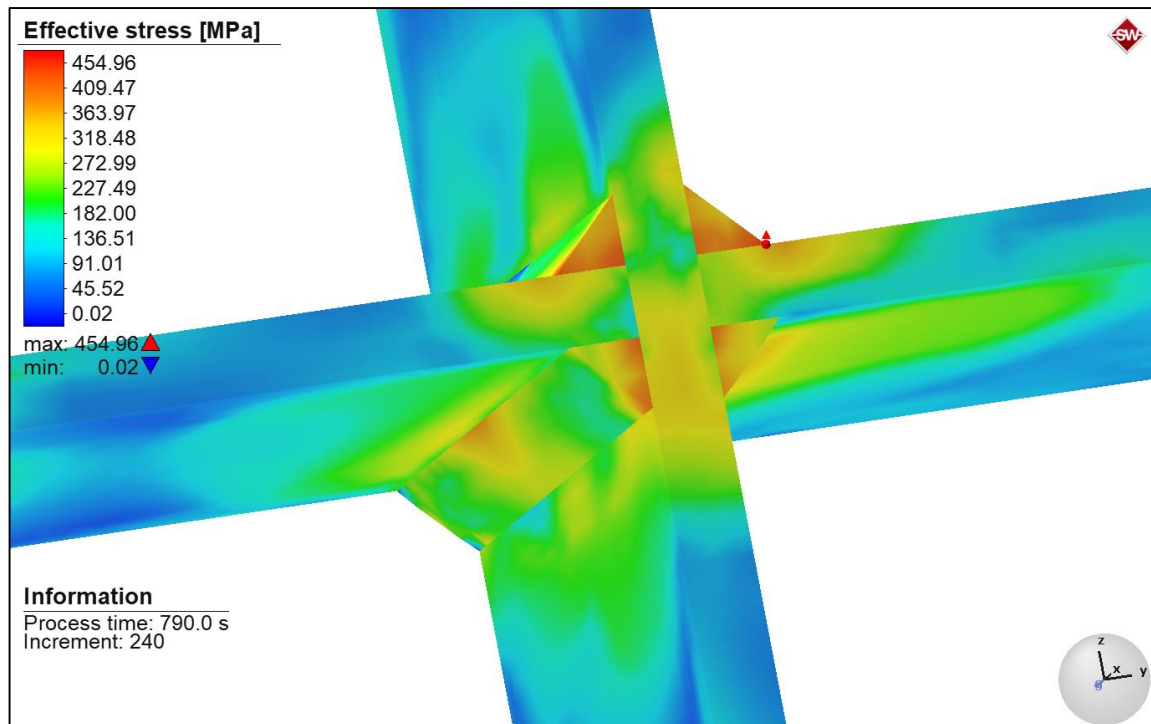


Рисунок 2.23 – Розподіл полів залишкових еквівалентних напружень за Мізесом при зварюванні за технологічною схемою № 6

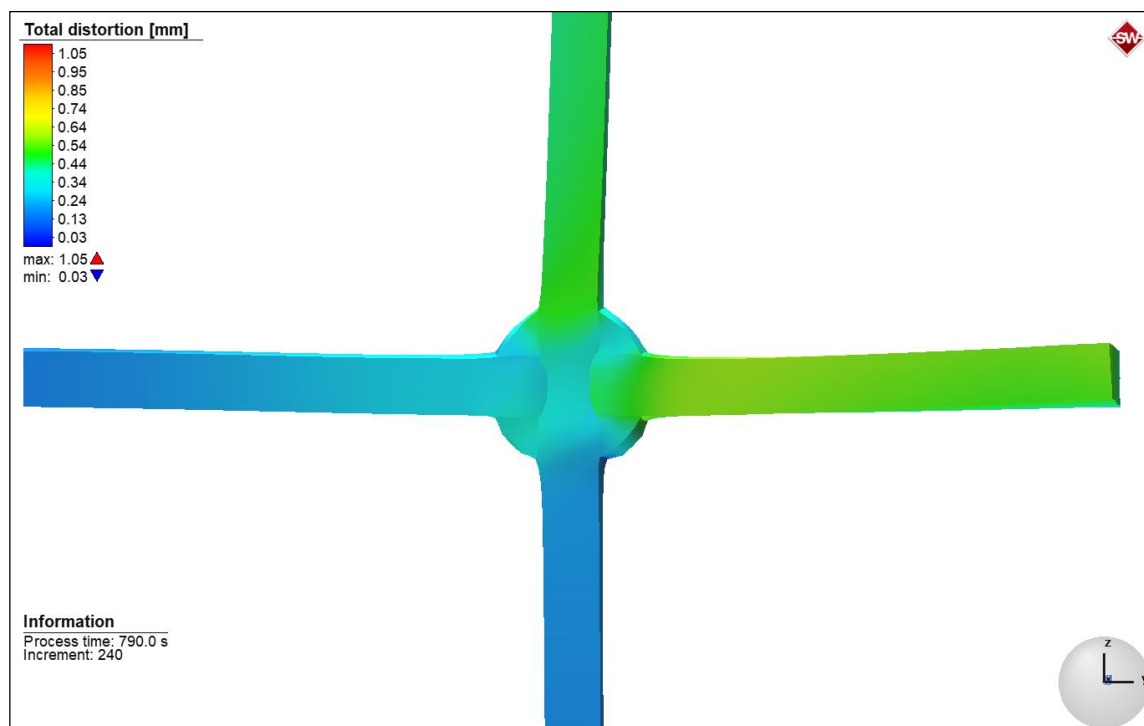


Рисунок 2.24 – Переміщення зварного вузла для технологічної схеми №6

Величина максимальних еквівалентних напружень для всіх технологічних схем зварювання змінюється в межах: від мінімального значення ~ 448 МПа для схеми №3 до максимального значення ~ 467 МПа для схеми №4. Різниця складає $\sim 4\%$. Максимум напружень формується у прикінцевих областях зварних швів для будь-якої з шести технологічних схем. Однак, для технологічних схем №1, №2, №4 та №5 він зосереджений у прикореневій області 1-го зварного шва, оскільки цей зварний шов знаходиться у «жорстких» умовах, викликаних перерозподілом напружень після зварювання кожного наступного шва. Для технологічної схеми №3 максимум напружень утворюється у прикореневій області 3-го шва, а для технологічної схеми №6 максимальні напруження зосереджені в місці переходу від металу 2-го шва до пластини «Stenka 1».

Аналіз переміщень у зварному вузлі показав, що для технологічних схем №1, №3 та №4 остаточні переміщення складають менше 1,0 мм і становлять відповідно 0,81 мм, 0,53 мм і 0,88 мм. Для схем №2, №5 і №6 максимальні переміщення складають 1,12 мм, 1,18 мм і 1,05 мм відповідно.

Висновки до розділу 2

1. Розроблена скінченно-елементна модель зварного вузла на основі одночасного розв'язування рівнянь теплового балансу і механіки твердого деформованого тіла дозволяє визначати температурні поля від зварювальної дуги, а також поля зварювальних напружень і деформацій для трьох заданих комбінацій конструкційних і зварювальних матеріалів: сталь Ст3сп і дріт Св-08Г2С; сталь 09Г2С і дріт Св-08Г2С; сталь 30ХГСА і дріт Св-08Х20Н9Г7Т.
2. Ширина зон пластичних деформацій у пластині «Stenka 1» для Ст3сп у ~ 2 рази більша ніж для 30ХГСА і у $\sim 1,67$ рази більша ніж для 09Г2С і становить ~ 50 мм, ~ 26 мм і ~ 30 мм відповідно; у пластині «Stenka 2» розміри пластичних зон мають незначну асиметрію і мало відрізняються за величиною від розмірів пластичних зон для пластини «Stenka 1»: для Ст3сп ця величина у $\sim 1,83$ рази більша ніж для 30ХГСА і у $\sim 1,63$ рази більша ніж для 09Г2С і становить ~ 44 мм, ~ 24 мм і ~ 27 мм відповідно, що пояснюється більшою податливістю з площини пластини «Stenka 2» і різними механічними характеристиками цих сталей.
3. У середньому поперечному перерізі центральної частині зварного вузла утворюються еквівалентні напруження, які становлять 258..282 МПа для Ст3сп, 330...355 МПа – для 09Г2С і 783...827 МПа – для 30ХГСА, що відповідає рівню границі текучості даних матеріалів.
4. В результаті розв'язання нелінійної зв'язаної задачі термо-пружно-пластичності від зварювання поздовжніх швів встановлено, що рівень максимальних еквівалентних напружень для зварного вузла в цілому, виготовленого зі сталі Ст3сп становить ~ 457 МПа, що є меншим за границю міцності даної сталі 490 МПа; для сталі 09Г2С - ~ 700 МПа, що перевищує границю міцності цієї сталі 590 МПа, і для сталі 30ХГСА - ~ 1103 МПа, що також перевищує її границю міцності 1080 МПа, і вимагає вибору в якості конструкційного матеріалу сталі Ст3сп.

5. Зварювання хрестового вузла зі сталі СтЗсп за різними технологічними схемами показало, що зміна послідовності заварювання швів не впливає на величину залишкових еквівалентних напружень. Різниця між максимальними напруженнями ~ 448 МПа, отриманими при зварюванні за схемою №3, та максимальними напруженнями ~ 467 МПа для схеми №4 не перевищує 4%.
6. Зварювання вузла за технологічною схемою №3, на відміну від інших технологічних схем, дозволяє отримати мінімальні переміщення в конструктивних елементах зварного вузла на рівні 0,53 мм, що забезпечує мінімальне спотворення геометричних розмірів елементів екрану.

РОЗДІЛ 3 Визначення коефіцієнтів концентрації напружень для заданих конструктивних параметрів кутових зварних швів

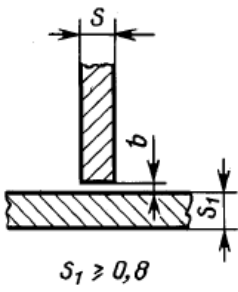
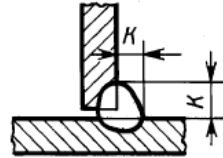
3.1 Розробка скінченно-елементної моделі хрестового зварного з'єднання для визначення коефіцієнту концентрації напружень

Розрахунок ККН відноситься до задач, які пов'язані з труднощами їх визначення, оскільки наявні невизначеності, обумовлені геометрією хрестового зварного вузла та геометрією в зоні переходу від основного матеріалу до металу шва, формою кутових зварних швів, їх розмірами.

Для визначення впливу ККН на міцність та надійність зварного вузла необхідно визначити величину ККН та розміри зони зосередження локальних напружень, в межах яких відбувається сумісна дія локальних напружень із залишковими зварювальними напруженнями.

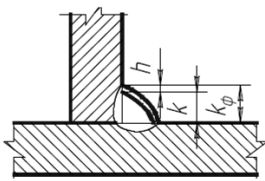
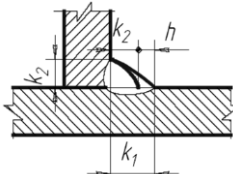
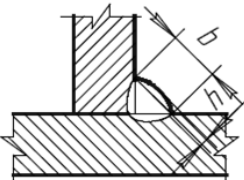
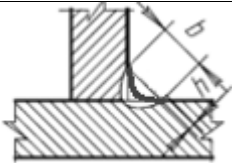
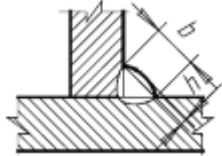
Визначення закономірностей розподілу локальних напружень у зварному з'єднанні, виконаних згідно вимог нормативних документів ГОСТ 14771-76 [40] та ГОСТ 23118-99 [41]. Для хрестового зварного з'єднання з товщинами конструктивних елементів 4 мм розміри кутових зварних швів визначалися згідно типу Т1 (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Конструктивні розміри зварних швів [40]

Умовне познач.	Конструктивні елементи		Спосіб зварювання	s, мм	b, мм
	Підготовка кромки	Зварного шва			
T1			УП	3,2-5,5	0 ^{+1,0}

Основними геометричними параметрами кутового зварного шва, зміна яких впливає на розподіл локальних напружень є: опуклість або увігнутість зварного шва, асиметрія катетів, радіус переходу від основного металу до металу шва, зміна величини катету (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 - Конструктивні параметри кутових зварних швів

Конструктивний параметр	Схематичне зображення	Діапазон допустимих значень
Катет кутового шва		3 ... 4,8 мм
Асиметрія катету кутового шва		4 : 4,8 мм
Опуклість		$\leq 0,3 \cdot K$
Увігнутість		$\leq 0,3 \cdot K$
Радіус переходу		$0,1 \leq r \leq 1,0$

Методика дослідження, заснована на врахуванні впливу конструктивних факторів на розподіл локальних напружень, передбачає послідовний розгляд впливу кожного з цих факторів окремо.

Встановлення величини локальних напружень в зоні концентрації напружень виконується на основі числового моделювання в програмному комплексі Simulia Abaqus в пружній постановці [42].

Для дослідження локального напруженого стану та величини ККН розроблена плоска модель поперечного перерізу хрестового зварного з'єднання. Досліджуваний зварний зразок має 2 площини симетрії, при цьому навантаження прикладається симетрично з обох сторін від будь-якої площини симетрії, тому для зменшення витрат часу на обчислення розрахунки виконували для $\frac{1}{4}$ моделі з призначенням граничних умов симетрії відносно напрямків ОХ та ОУ (рис. 3.1).

Розрахункові моделі зварних з'єднань створювалися з використанням кубічних елементів повного інтегрування другого порядку «CPS8».

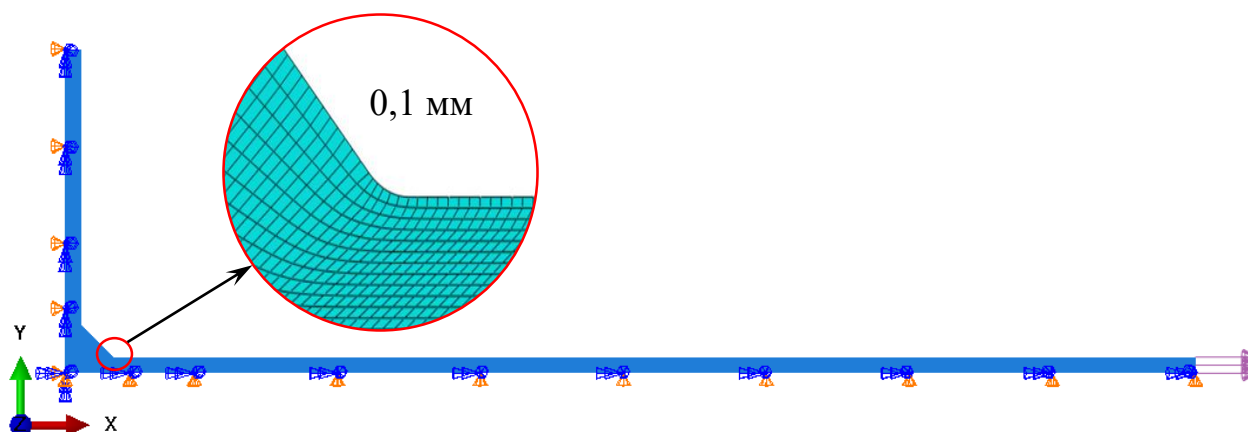


Рисунок 3.1 – Скінченно-елемента модель зварного вузла
з граничними умовами симетрії

Розподілене навантаження, прикладене до торця моделі, задане так, щоб номінальні напруження, які діють в місцях віддалених від місця концентрації напружень, дорівнювали 1 МПа і, таким чином, величина напружень в місці концентрації буде характеризувати величину ККН.

В рамках дослідження розраховували зварні з'єднання з розмірами катетів кутового шва 3 та 4 мм. Для визначення впливу конструктивних елементів розглядали гранично допустимі мінімальні та максимальні їх значення згідно визначених норм (табл. 3.2). Для дослідження впливу геометрії шва у зоні переходу від металу шва до основного металу, використовували узагальнені дані [43] зміни радіусів переходів у різних зварних з'єднаннях, виконаних дуговим

зварюванням у активних газах. Згідно цих даних, розміри радіусів переходу можуть бути в діапазоні від 0,1 до 1,0 мм. Співвідношення катетів зварного шва 1:1 та 1:1,2.

3.2 Визначення оптимальних параметрів зварних швів з урахуванням концентрації напружень

Для кожного виду конструктивного фактору побудовані графіки розподілу еквівалентних напружень для визначення місця концентрації напруження та відстані, на якій геометрична форма шва не впливає на розподіл локальних напружень.

Вплив номінальних розмірів катету шва визначався для величин, рекомендованих ГОСТ 14771-76: 3 мм (мінімальний розмір катету кутового шва для сталей з межею текучості до 400 МПа) та 4 мм (максимальний розмір катету не повинен перевищувати 1,2 товщини більш тонкого елемента – $1,2 \cdot 4 \text{ мм} = 4,8 \text{ мм}$).

Вплив розміру катету у хрестовому зварному з'єднанні при значеннях 3 та 4 мм на характер розподілу локальних напружень показано на рис. 3.2 - 3.4.

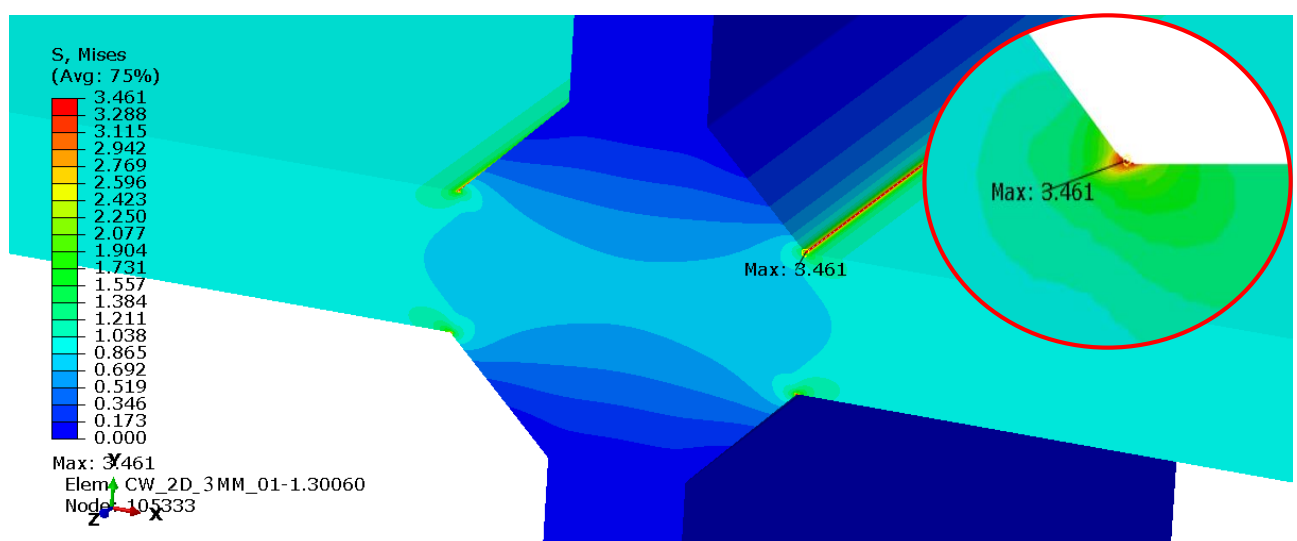


Рисунок 3.2 – Розподіл еквівалентних напружень для $K=3 \text{ мм}$ і $r=0,1 \text{ мм}$

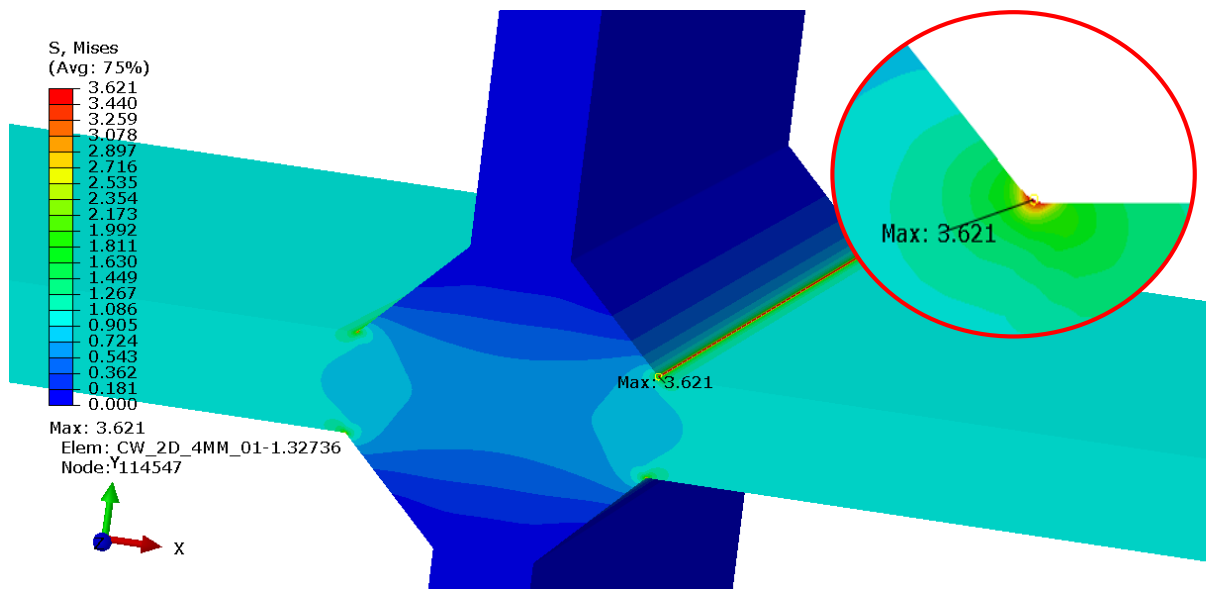


Рисунок 3.3 – Розподіл еквівалентних напружень для $K=4$ мм і $r=0,1$ мм

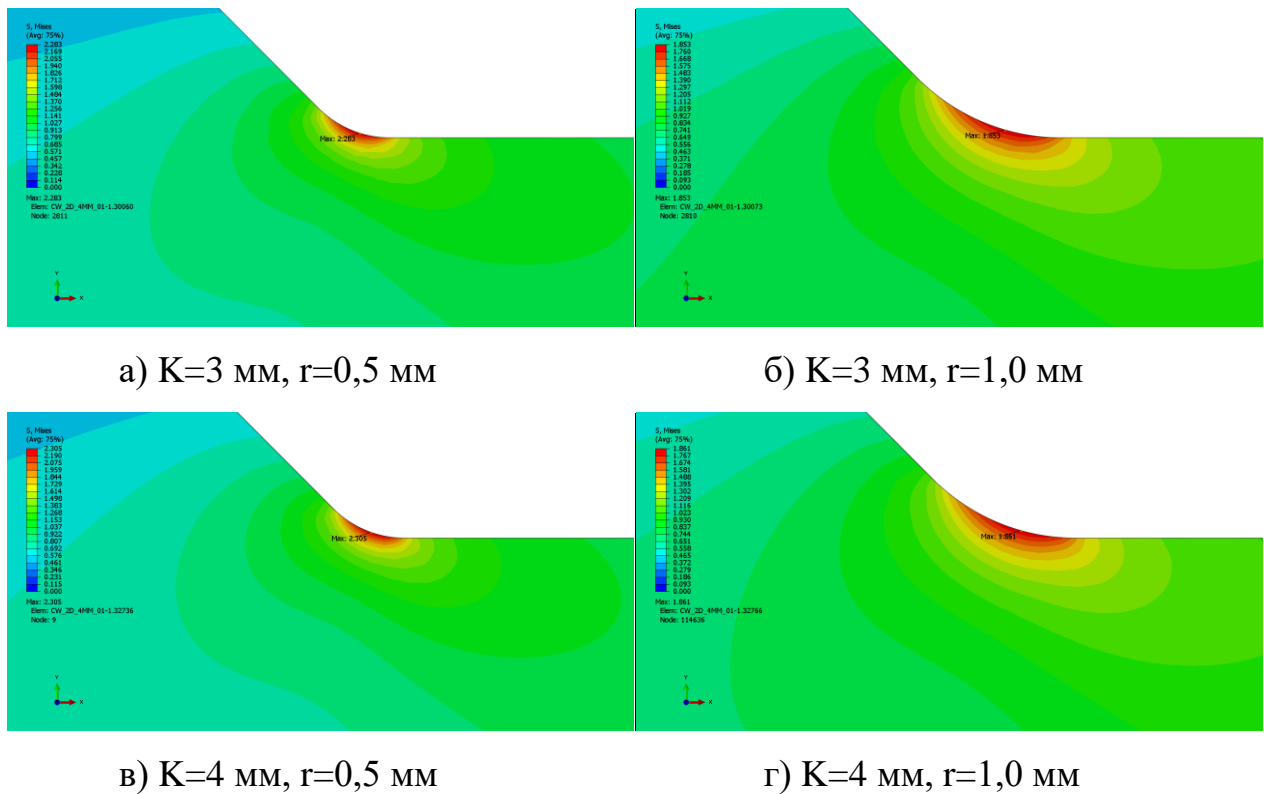


Рисунок 3.4 – Поля еквівалентних напружень для комбінацій K та r

Вплив розміру катету шва на характер розподілу напружень показує, що збільшення величини катету від 3 до 4 мм, при $r=0,1$ мм, призводить до збільшення концентрації напружень біля кореня шва на 4,6%: від 3,461 до 3,621 відповідно. При збільшенні радіусу переходу до $r=0,5$ мм різниця між ККН для

катетів 3 та 4 мм складає 1%, а при $r=1,0$ мм – 0,5%. Збільшення радіусу переходу від 0,1 мм до 0,5 мм та 1,0 мм, для двох розмірів катетів призводить до того, що ККН в хрестовому зварному з'єднанні зменшується на 34% та 46% відповідно. З графіку розподілу концентрації напружень рис. 3.5 - 3.6 видно, що локальне збільшення напружень спостерігається поблизу лінії переходу від основного металу до металу шва та на відстані 1,5...1,8 мм від лінії сплавлення.

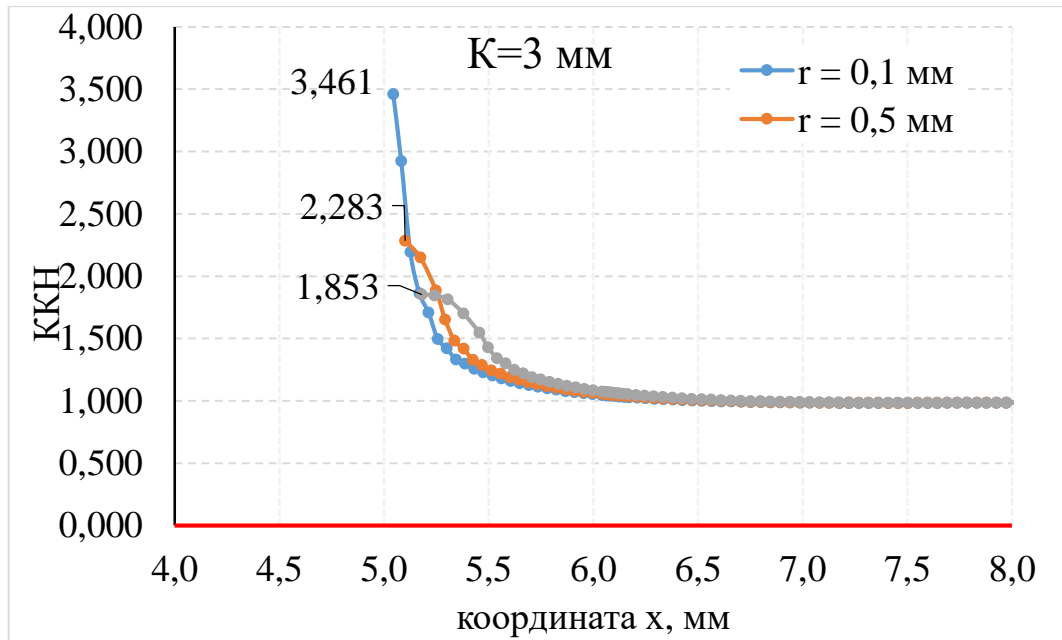


Рисунок 3.5 – Розподіл концентрації напружень для комбінацій $K=3$ мм та r

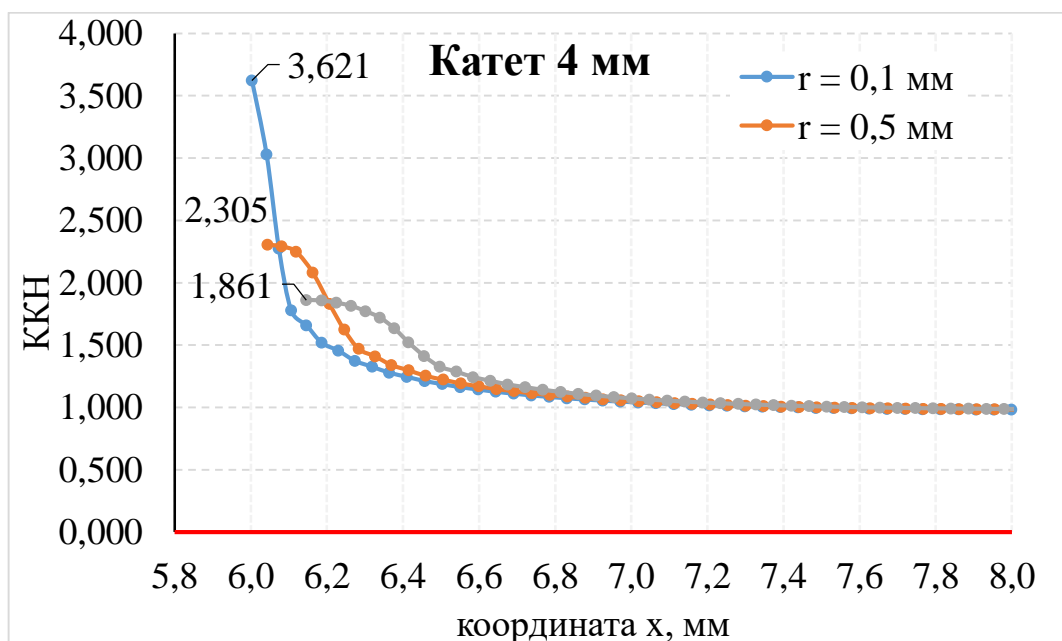


Рисунок 3.6 – Розподіл концентрації напружень для комбінацій $K=4$ мм та r

Вплив опуклості та увігнутості на величину концентрації напружень показано на рис. 3.7 - 3.10. Величина опуклості та увігнутості кутового шва складає 30% від розміру катету (1,2 мм для $K=4$ мм), що відповідає максимальному їх значенню у відповідності до ГОСТ 14771-76.

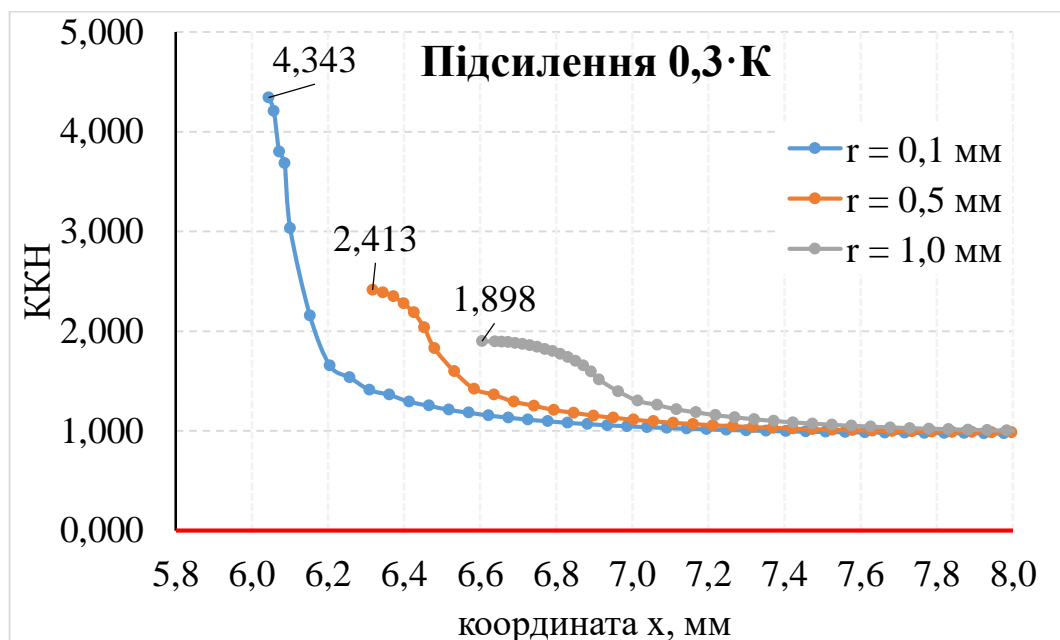


Рисунок 3.7 – Розподіл ККН при наявності опуклості при різних величинах r

Збільшення підсилення кутового шва (опуклості) до максимального значення 30% від величини катету $K=4$ мм, призводить до зниження напружень у шві за рахунок збільшення площі наплавленого металу. Однак, при цьому величина ККН в місцях переходу від основного металу до металу шва збільшується до величин 1,898, 2,413 та 4,343 для радіусів переходу 1,0 мм, 0,5 мм та 0,1 мм відповідно, що на 2%, 4,7% та 20% більше, порівняно з катетом без підсилення. При збільшенні радіусу переходу величина ККН зменшується в 1,8 та 2,25 разів. Локальна концентрація напружень спостерігається на відстані до 1,8 мм від лінії сплавлення.

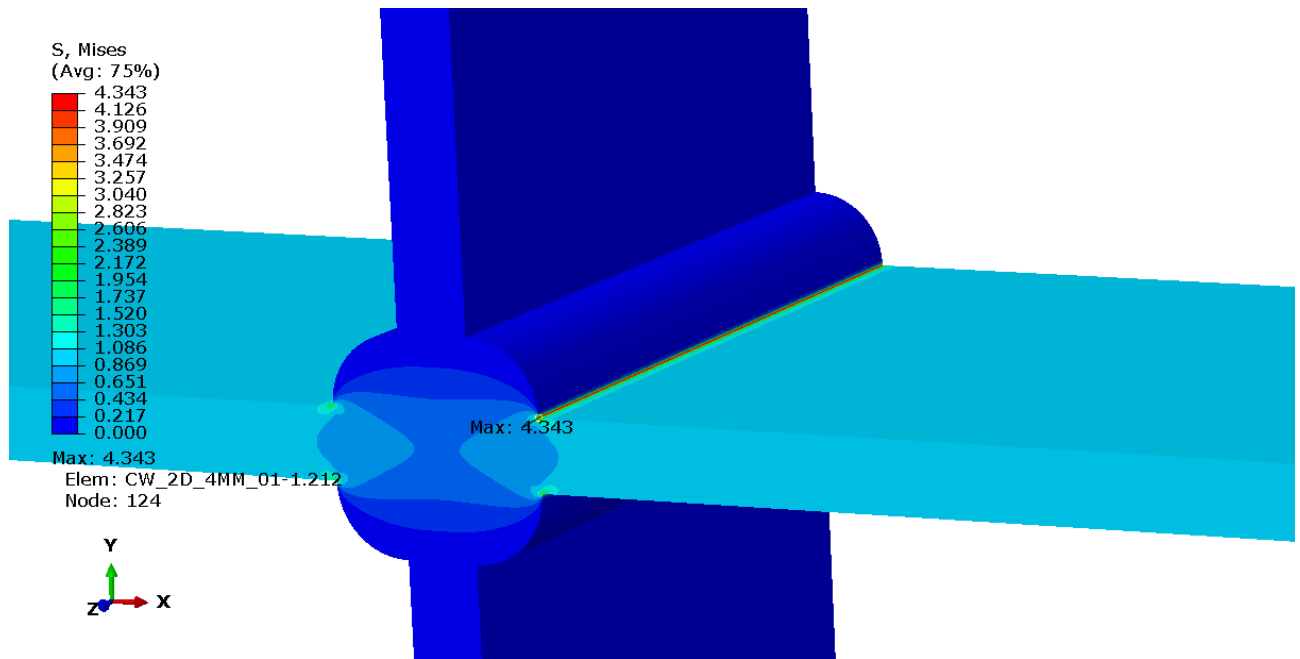
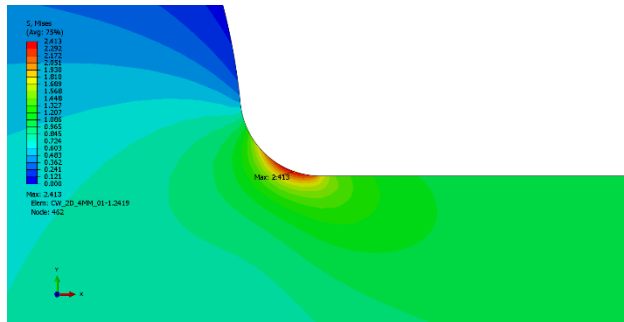
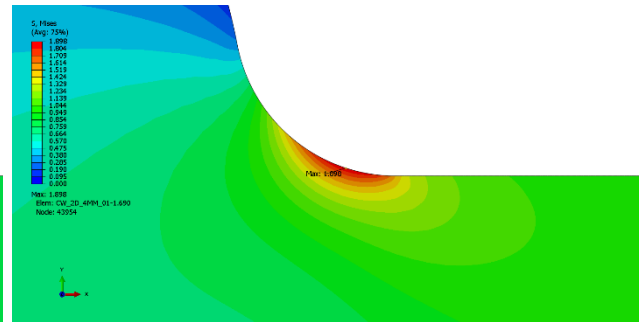
а) $r=0,1$ ммб) $r=0,5$ ммв) $r=1,0$ мм

Рисунок 3.8 – Поля еквівалентних напружень для опуклості 1,2 мм

В той же час увігнутість кутового шва, до максимального значення 30% від розміру катету, призводить до значного зниження локальних напружень. Максимальне значення ККН складає 1,792 при $r=0,1$ мм та зменшується до величин 1,66 при $r=0,5$ мм і 1,537 при $r=1,0$ мм.

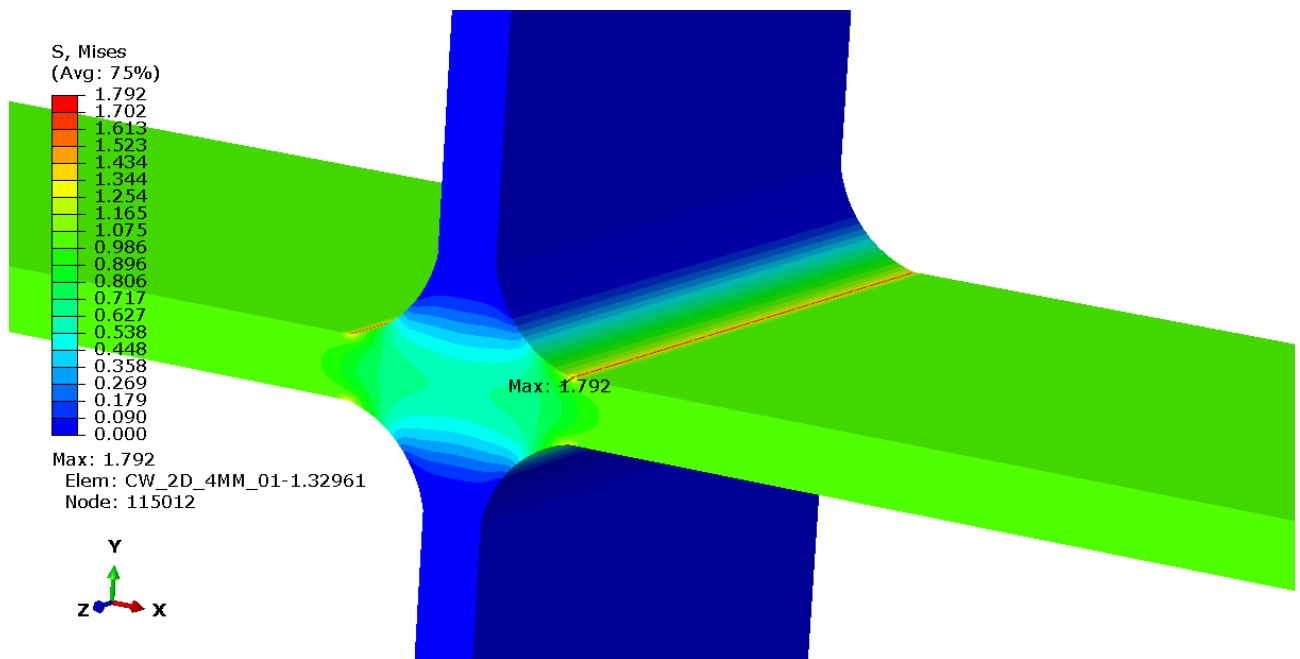
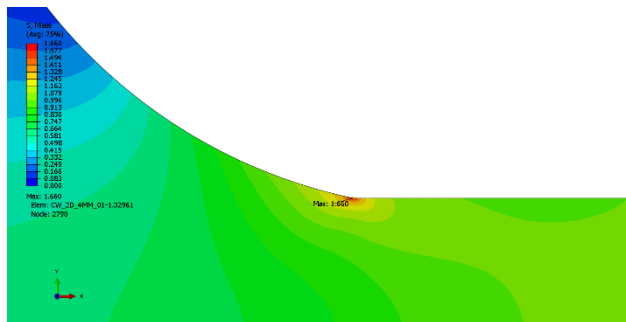
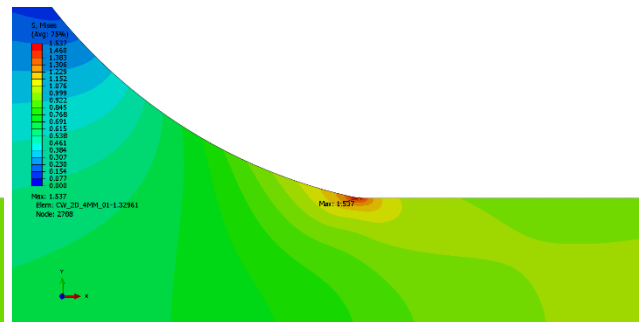
а) $r=0,1$ ммб) $r=0,5$ ммв) $r=1,0$ мм

Рисунок 3.9 – Поля еквівалентних напружень для увігнутості 1,2 мм

Як видно з графіка розподілу локальних напружень, при наявності увігнутості шва, вплив радіуса переходу на значення локальних напружень значно менший: величина ККН зменшується на 7,3% для $r=0,5$ мм та на 14,3% при $r=1,0$ мм. При цьому вплив величини радіуса переходу помітний тільки в місці сплавлення, а починаючи з відстані 0,2 мм від лінії сплавлення величина радіуса не впливає на зміну ККН. Концентрація напружень має місце на відстані до 1,4 мм від лінії сплавлення.

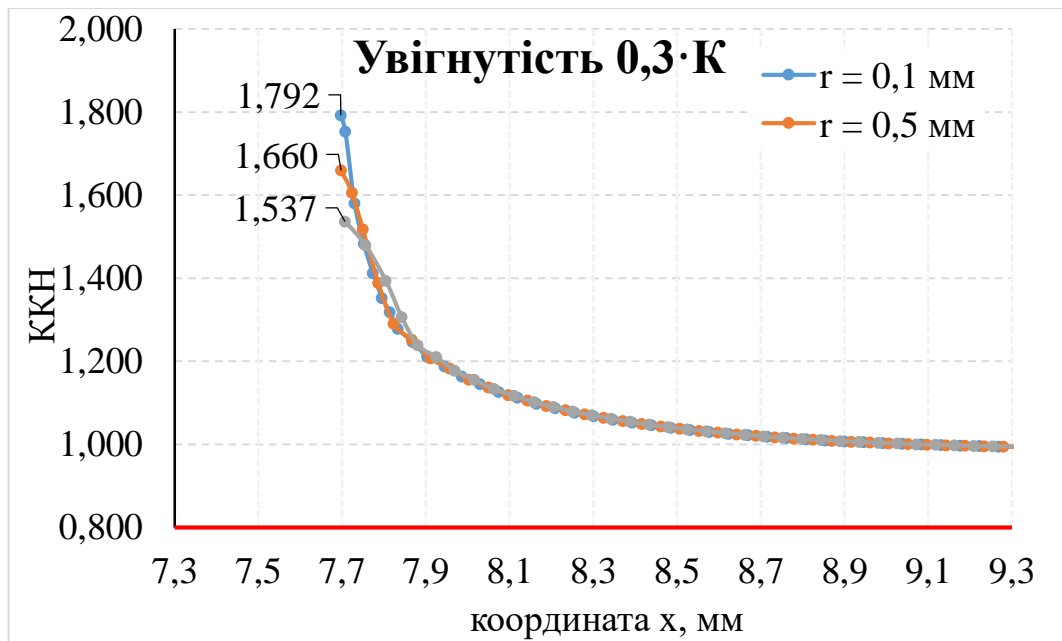


Рисунок 3.10 – Розподіл ККН при наявності увігнутості при різних величинах r

На рис. 3.11-3.12 показано вплив асиметрії кутового зварного шва, при якій збільшений катет розташований вздовж напрямку прикладення сили. Асиметрія кутового шва майже не зменшує концентрацію напружень. Так, в зоні сплавлення величина ККН складає 3,439, 2,249 та 1,844 для радіусів переходу 0,1 мм, 0,5 мм та 1,0 мм відповідно.

Вплив асиметрії має місце тільки при малих радіусах переходу $r \leq 0,5$ мм і складає від ~5% до 2,4%. При $r > 0,5$ мм зменшення концентрації не перевищує 1%.

Збільшення радіуса від 0,1 мм до 0,5 мм веде до зменшення напружень на 34,6%, а збільшення радіуса до 1,0 мм - на 46,4%. Концентрація напружень має місце на відстані до 1,6 мм від лінії сплавлення.

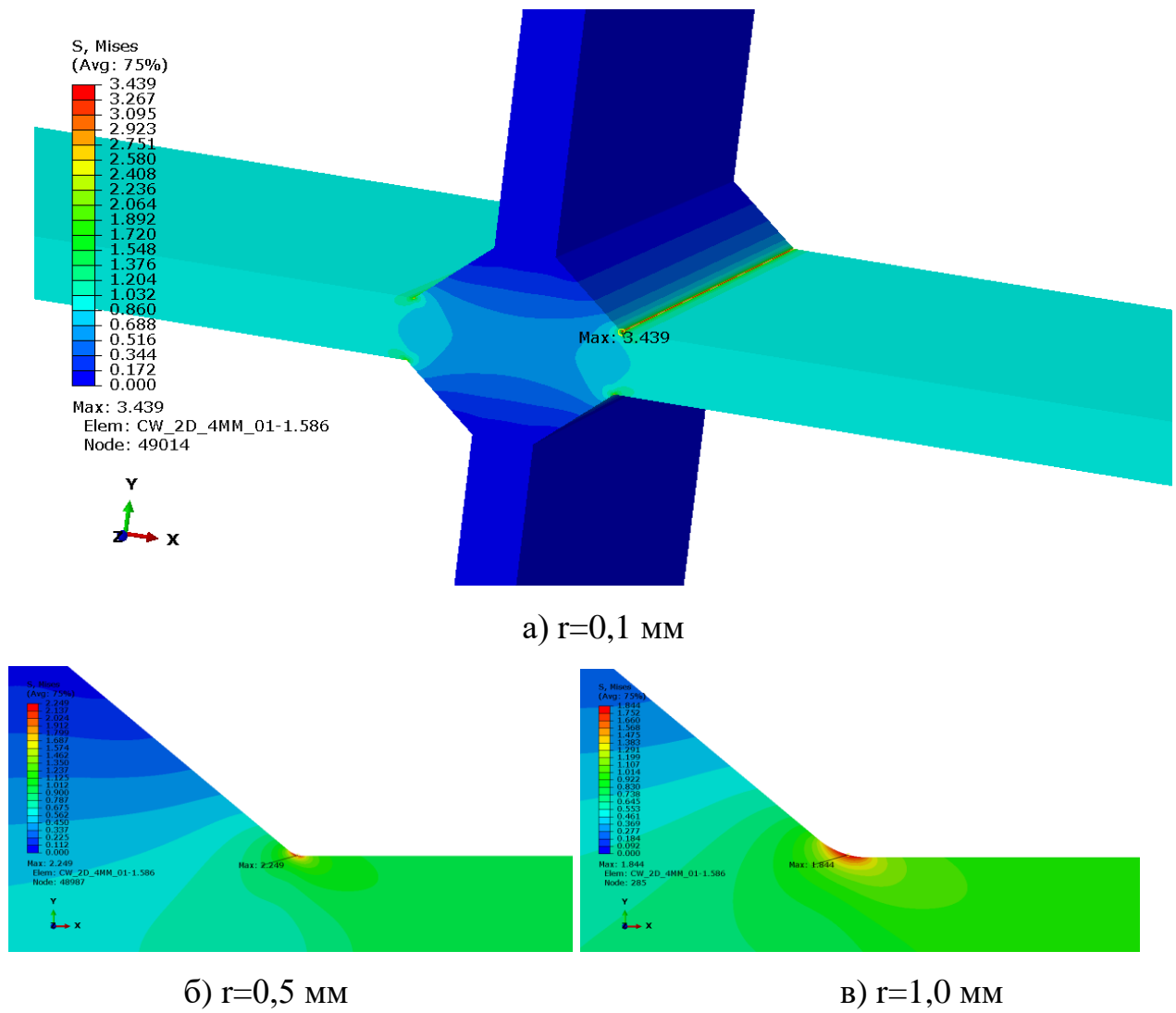


Рисунок 3.11 – Поля еквівалентних напружень при наявності асиметрії катетів

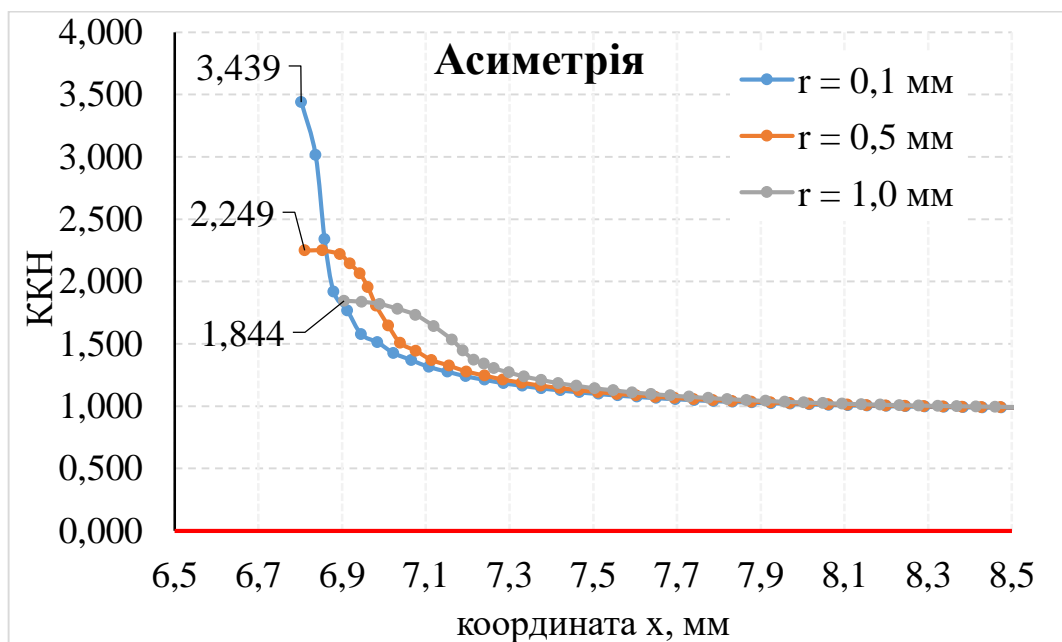


Рисунок 3.12 – Розподіл ККН при наявності асиметрії катетів для різних r

Величини ККН, розрахованих для різних комбінацій конструктивних факторів зварних швів хрестового зварного з'єднання представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Величина ККН для конструктивних факторів

Конструктивний фактор К, мм		Коефіцієнти концентрації напружень			Зменшення ККН, %
		Радіус переходу r, мм			
		0,1	0,5	1,0	
K1=K2	3	3,461	2,283	1,853	46,5
	4	3,621	2,305	1,861	48,6
K1:K2	4:4,8	3,439	2,249	1,844	46,4
Опуклість 0,3·K1	4	4,343	2,413	1,898	56,3
Увігнутість 0,3·K1	4	1,792	1,660	1,537	14,2

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що найбільш впливовим фактором на величину ККН є радіус переходу від основного металу до металу зварного шва. Збільшення радіусу переходу від 0,1 мм до 1,0 мм дозволяє зменшити величину ККН:

- для рівнокатетного та асиметричного шва на 46,4% - 48,6%;
- для шва з опуклістю – на 56,3%;
- для увігнутого шва – на 14,2%.

2. При зварюванні рівнокатетних кутових швів, при збільшенні величини катету з 3 мм до 4 мм, величина ККН майже не змінюється і становить 1,853 та 1,861 відповідно при радіусі переходу 1,0 мм. Це дозволяє використовувати збільшений катет для підвищення міцності зварного з'єднання та зменшення напружень в перерізі шва.

3. Асиметрія катетів зварного шва при співвідношенні величин катетів $K_1:K_2 = 1:1,2$ призводить до зменшення величини ККН на 5%, 2,4% та 0,9% в порівнянні з рівнокатетним швом для радіусів переходу 0,1; 0,5; 1,0 мм відповідно.

4. Опукла форма кутового зварного шва призводить до збільшення ККН на 20%, 4,7% та 2% в порівнянні з формою шва без підсилення при збільшенні радіусів переходу з 0,1 до 0,5 і 1,0 мм.

5. Увігнута форма шва, величиною до 30% від катету, забезпечує найнижчі значення ККН на рівні 1,792-1,537, у порівнянні з іншими формами шва.

6. Встановлено, що для увігнутих швів, на відміну від інших форм шва, вплив радіусу переходу на величину ККН спостерігається безпосередньо в місці переходу від основного металу до металу шва.

7. З характеру розподілу локальних напружень в хрестовому зварному з'єднанні встановлено, що вплив геометрії зварного шва спостерігається на відстанях до ~2 мм від лінії сплавлення. При цьому розміри зони концентрації напружень збільшуються, а величина ККН зменшується.

РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Оскільки завдання магістерської дисертації полягає в математичному моделюванні процесу зварювання для аналізу залишкового напруженого стану в хрестових зварних з'єднаннях та визначення коефіцієнтів концентрації напружень в них з використанням програмного комплексу Simufact Welding та Simulia Abaqus, то всі обчислення проводяться на комп'ютері. Тому важливим є розробка окремого розділу з охорони праці при роботі за комп'ютером.

Працюючи з комп'ютером, людина потрапляє під вплив різноманітних факторів: електромагнітних полів (діапазон радіочастот: високочастотний, ультра високочастотний і надвисокочастотний), інфрачервоного та рентгенівського випромінювання, статичної електрики.

Робота з комп'ютером вимагає значної розумової напруги і супроводжується нервово-емоційним навантаженням операторів, високою напругою зорової роботи і відчутним навантаженням на м'язи рук під час роботи з клавіатурою комп'ютера. Велике значення має раціональна конструкція і розташування елементів робочого місця, що є важливим для підтримки оптимальної робочої пози в процесі праці.

У процесі роботи з комп'ютером необхідно дотримуватись правильного режиму роботи і відпочинку. В протилежному випадку в людини, що працює за комп'ютером, спостерігається незадоволеність роботою, головний біль, роздратування, порушення сну, втома і больові відчуття в очах, попереку, у ділянці шиї та рук.

4.1 Негативні фактори під час роботи з комп'ютером

Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) роботу з персональним комп'ютером віднесла до небезпечних, бо їй притаманний фактор постійно діючого стресу. Через це небезпеці піддаються всі життєво важливі органи людини, з'являється ризик виникнення серйозних хвороб [44].

Основними наслідками регулярної роботи з комп'ютером без застосування захисних засобів можуть бути: захворювання органів зору (60% користувачів); хвороби серцево-судинної системи (20%); захворювання шлунково-кишкового тракту (10%); шкірні захворювання (5%); різноманітні пухлини.

Електромагнітні поля біля комп'ютера (особливо низькочастотні) негативно впливають на людину і в першу чергу на її центральну нервову систему, викликаючи головний біль, запаморочення, нудоту, депресію, безсоння, відсутність апетиту, виникнення синдрому стресу. Причому нервова система реагує навіть на короткі за тривалістю впливи слабких полів: змінюється гормональний стан організму, порушуються біоструми мозку. Це призводить до погіршення зору, ускладненню серцево-судинних захворювань, зниженню імунітету, виникають негативні впливи на плин вагітності [44].

Рентгенівське випромінювання. Дослідження показують, що монітор комп'ютера не є небезпечним для користувача, оскільки інтенсивність такого випромінювання нижча за гранично допустимі норми (ГДН). Відповідно до "Норм радіаційної безпеки України" (НРБУ-97), гранично допустима потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана відео-термінала становить $7,74 \times 10^{-12}$ Кл/кг, що відповідає еквівалентній дозі 0,1 мбер/год. (100 мкр/год.) [45].

Оптичне випромінювання включає: ультрафіолетове (УФ), світлове та інфрачервоне.

УФ-випромінювання впливає, як правило, на шкіру та очі людини. Аналіз досліджень робочих місць користувачів комп'ютерів показує, що у 86% проведених вимірювань, тобто в більшості випадків, УФ-випромінювання і не

було виявлено. У тих же випадках, коли таке випромінювання вдалося виявити, його рівень становив у середньому $0,001 \text{ Вт/м}^2$ [45].

Світлове випромінювання впливає, в основному, на очі і провокує їх втому та запалення райдужної оболонки. Однак ці симптоми швидко минають і не викликають патологічних змін.

ІЧ-випромінювання — довжина хвиль обмежена від 0,76 мм до 1 мм. Для більшості біологічних матеріалів випромінювання цього діапазону вважаються непрозорими. Проведені дослідження показали, що інтенсивність інфрачервоних випромінювань відео-терміналів нижча за показник, передбачений ДСанПіН 3.3.2-007-98 [45].

Електромагнітні випромінювання (ЕМВ) радіочастотного діапазону. Джерелом ЕМВ є монітор. Тому, обираючи робоче місце для комп'ютера, необхідно пам'ятати, що його задня і бокові стінки можуть бути джерелом значно більшого ЕМВ, аніж екран.

Науковці доводять, що радіочастотне випромінювання впливає на центральну нервову систему (ЦНС) і є вагомим стрес-фактором.

Більшість учених вважають, що як короткостроковий, так і тривалий вплив усіх видів випромінювання від екрана монітора не є небезпечним для здоров'я персоналу, який обслуговує комп'ютери. Проте вичерпні дані про безпеку впливу випромінювань від монітора на людей, які працюють з комп'ютерами, ще не отримані, дослідження у цьому напрямі тривають [45].

Для зменшення впливу перерахованих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори зі зниженою випромінювальною здатністю, а також дотримуватись регламентованого режиму праці та відпочинку.

Інтенсивна і тривала робота з клавіатурою комп'ютера може стати джерелом важких професійних захворювань рук. Робота з клавіатурою є причиною 12% профзахворювань, викликаних повторюваними рухами. Для зменшення шкідливого впливу клавіатури фірма Microsoft розробила ергономічну клавіатуру, що своєю формою, конструкцією знижує

навантаження на руки. Творці клавіатури сподіваються, що вона застрахує оператора від тунельного синдрому зап'ястного каналу [44].

4.2 Вимога безпеки праці та інженерні розв'язки при роботі з комп'ютером

4.2.1 Основні вимоги з охорони праці до користувачів комп'ютера

- 1) При експлуатації комп'ютера необхідно пам'ятати, що первинні мережі електроспоживання під час роботи знаходяться під напругою, яка є небезпечною для життя людини, тому необхідно користуватися справними розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електроприладами [46].
- 2) До роботи з комп'ютером допускаються працівники, з якими проведений вступний інструктаж та первинний інструктаж (на робочому місці) з питань охорони праці, техніки безпеки, пожежної безпеки та зроблений запис про їх проведення у спеціальному журналі інструктажів [46].
- 3) При виявленні в обладнанні комп'ютера ознак несправності (іскріння, пробоїв, підвищення температури, запаху гару, ознак горіння) необхідно негайно припинити роботи, відключити усе обладнання від електромережі і терміново повідомити про це відповідних посадових осіб, спеціалістів [46].
- 4) Вміти діяти в разі ураження інших працівників електричним струмом або виникнення пожежі [46].
- 5) Знати місця розташування первинних засобів пожежогасіння, план евакуації працівників, матеріальних цінностей з приміщення в разі виникнення пожежі [46].

4.2.2 Вимоги охорони праці до приміщення для роботи з комп'ютером

- 1) Стіни приміщень для роботи з комп'ютером мають бути пофарбовані чи обклеєні шпалерами пастельних кольорів з коефіцієнтом відбиття 40 – 60 %. У випадках, коли такі приміщення зорієнтовані на південь, вікна повинні обладнуватися сонцезахисними пристроями (жалюзі, штори і т. п.) [46].
- 2) Для освітлення приміщень з комп'ютером необхідно використовувати люмінесцентні світильники. Освітленість робочих місць у горизонтальній площині на висоті 0,8 м від підлоги повинна бути не менше 400 лк. Вертикальна освітленість у площині екрану не більше 300 лк [46].
- 3) У приміщеннях для роботи з комп'ютером необхідно проводити щоденне вологе прибирання та регулярне провітрювання протягом робочого дня. Видалення пилу з екрану необхідно проводити не рідше одного разу на день [46].

4.2.3 Вимоги охорони праці до робочого місця користувача комп'ютера

- 1) Робочі місця для працюючих з дисплеями необхідно розташовувати таким чином, щоб до поля зору працюючого не потрапляли вікна та освітлювальні прилади. Відео термінали повинні встановлюватися під кутом 90 - 105 градусів до вікон та на відстані, не меншій 2,5 - 3 м від стіни з вікнами. До поля зору працюючого з дисплеєм не повинні потрапляти поверхні, які мають властивість віддзеркалювання. Покриття столів повинне бути матовим з коефіцієнтом 0,25 - 0,4 [46].
- 2) Відстань від очей користувача до екрану повинна становити 500 - 700 мм, кут зору – 10-20 градусів, але не більше 40 градусів, кут між верхнім краєм відео терміналу та рівнем очей користувача повинен бути меншим 10 градусів. Найбільш вигідне є розташування екрану перпендикулярно до лінії зору користувача [46].

4.2.4 Вимоги охорони праці до режиму праці і відпочинку користувача комп'ютера

- 1) З метою уникнення перевантаження організму робочий день користувача комп'ютером повинен проходити у раціональному режимі праці та відпочинку, який передбачає дотримання регламентованих перерв, їх активне проведення, систематичне проведення виробничої гімнастики [46].
- 2) Загальний час роботи з відео терміналом не повинен перевищувати 50% тривалості робочого дня. Якщо виконання роботи пов'язане тільки з використанням комп'ютера, то при неможливості зміни діяльності необхідно робити перерви та паузи. Для робіт, які виконуються з великим навантаженням, слід робити 10 - 15 хвилинну перерву через кожну годину, для мало інтенсивної роботи такі перерви слід робити через 2 години. Кількість мікропауз (до 1 хвилини) слід визначати індивідуально.
- 3) Форми та зміст перерв можуть бути різними: виконання альтернативних допоміжних робіт, які не вимагають великого напруження, приймання їжі та ін. На початку перерв виконується гімнастика для очей, під час однієї з перерв рекомендується проведення загальної гімнастики.
- 4) Виконання фізичних вправ з нормативним навантаженням протягом робочого дня рекомендується індивідуально, залежно від відчуття втоми. Гімнастика повинна бути спрямована на корекцію вимушеної пози, покращення кровообігу, часткову компенсацію дефіциту рухливої активності [46].

4.2.5 Профілактичні засоби для забезпечення пожежної безпеки

В якості профілактичних заходів для забезпечення пожежної безпеки слід використовувати скриту електромережу, надійні розетки з пожежобезпечних матеріалів, силові мережі живлення устаткування виконувати кабелями, розрахованими на підключення в 3-5 разів більшого навантаження, включати й виключати живлення обладнання за допомогою штатних вимикачів [45]. Треба

регулярно робити очистку внутрішніх частин комп'ютерів, іншого устаткування від пилу, розташовувати комп'ютери на окремих неспалюваних столах. Для запобігання іскріння необхідно рідше встромляти і виймати штепсельні вилки з розеток [45].

4.3 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

4.3.1 Дії працівників у разі ураження електричним струмом

Терміново звільнити потерпілого від дії електричного струму (через відключення електроживлення в кімнаті, загального електроживлення на розподільному щиті або іншим способом); викликати швидку медичну допомогу (подзвонивши за міським телефоном 103); надати першу медичну допомогу потерпілому, враховуючи наступне [45]: 1) якщо потерпілий знепритомнів, але дихає, його необхідно рівно і зручно вкласти, розстебнути одяг, створити приплив свіжого повітря і забезпечити повний спокій; 2) при відсутності ознак життя до прибуття лікарів потерпілому необхідно робити штучне дихання.

4.3.2 Дії працівників у разі виникнення пожежі

При виникненні пожежі в приміщеннях негайно повідомити пожежну охорону за міським телефоном 101 [46]. При цьому необхідно назвати адресу, зазначити кількість поверхів будівлі, місце виникнення пожежі, обстановку на пожежі, наявність людей, а також повідомити своє прізвище; вжити (по можливості) заходи на евакуацію людей, гасіння (локалізацію) пожежі з використанням первинних засобів пожежогасіння та на збереження матеріальних цінностей; повідомити про виникнення пожежі керівника (заступників керівника) чи відповідальну компетентну посадову особу та чергового охорони; у разі необхідності, викликати інші аварійно-рятувальні служби (медичну, газорятувальну тощо) [46].

Висновки до розділу 4

1. Робота за комп'ютером негативно впливає на людину, на її нервову систему, часто може стати причиною головного болю та запаморочення. Робота з подібною технікою також може викликати нудоту і постійні стреси, які призводять до поганих наслідків не тільки зі здоров'ям біологічним, але і психічним. Одним з найчастіших наслідків є порушення самостійної роботи мозку та погіршення зору.
2. Через велику дозу випромінювання, може ослабнути імунітет та з'являться серцево-судинні захворювання.
3. Щоб уникнути подібних наслідків треба надзвичайно відповідально підходити до роботи з комп'ютерною технікою: зменшити час перебування перед екраном до мінімуму, робити невеликі перерви у роботі аби дати відпочити органам зору та організму в цілому. Крім того треба періодично виконувати вправи для профілактики захворювання зорових органів, а також слід виконувати неважкі фізичні вправи, які допоможуть тілу зняти напруження.

Загальні висновки

1. Розроблена тривимірна скінченно-елементна модель хрестового зварного з'єднання дозволяє моделювати нестационарні термодетформаційні процеси з урахуванням граничних умов, які імітують зв'язок вузла з усією конструкцією протикумулятивного екрану.
2. В результаті розв'язку зв'язаної задачі термо-пружно-пластичності методом скінчених елементів визначені температурні поля від зварювальної дуги, а також поля зварювальних напружень і деформацій для трьох заданих комбінацій конструкційних і зварювальних матеріалів: сталь СтЗсп і дрiт Св-08Г2С; сталь 09Г2С і дрiт Св-08Г2С; сталь 30ХГСА і дрiт Св-08Х20Н9Г7Т.
3. Для кожного з конструкційних матеріалів розміри пластичних зон у пластинах «Stenka 1» і «Stenka 2» майже не відрізняються за величиною. Ширина зон пластичних деформацій для СтЗсп у ~ 2 рази більша ніж для 30ХГСА і у $\sim 1,67$ рази більша ніж для 09Г2С і становить ~ 50 мм, ~ 26 мм і ~ 30 мм відповідно, що пояснюється різними механічними і теплофізичними характеристиками цих сталей.
4. В результаті розв'язання термомеханічної задачі від зварювання поздовжніх швів встановлено, що рівень максимальних еквівалентних напружень для зварного вузла, виготовленого зі сталі СтЗсп, становить ~ 457 МПа, що менше границі міцності основного металу ~ 490 МПа, а також границі міцності металу шва ~ 570 МПа, виконаного дротом Св-08Г2С. В той же час, для сталі 09Г2С максимальні напруження досягають рівня ~ 700 МПа, що перевищує границю міцності, як основного металу (~ 490 МПа), так і металу шва (~ 570 МПа); для сталі 30ХГСА максимальні напруження сягають ~ 1103 МПа, що також перевищує границі міцності, як основного металу (1080 МПа) так і металу шва (630 МПа), виконаного дротом Св-08Х20Н9Г7Т. І таким чином, в якості основного конструкційного матеріалу слід вибирати сталь СтЗсп і дрiт Св-08Г2С.
4. Аналіз залишкових еквівалентних напружень після зварювання хрестового вузла зі сталі СтЗсп за шістьма технологічними схемами показав, що зварювання

вузла за технологічною схемою №3 забезпечує найменший рівень залишкових напружень і мінімальні значення переміщень конструктивних елементів зварного вузла, що забезпечує збереження геометричних розмірів елементів екрану.

5. Розроблена двомірна скінченно-елементна модель для визначення величини ККН і впливу конструктивних факторів на концентрацію напружень у хрестових зварних з'єднаннях.

6. Визначено, що найбільш впливовим фактором на величину ККН є радіус переходу від основного металу до металу зварного шва. Збільшення радіусу переходу від 0,1 мм до 1,0 мм дозволяє зменшити величину ККН:

- для рівнокатетного та асиметричного шва на 46,4%-48,6%;
- для шва з опуклістю – на 56,3%;
- для увігнутого шва – на 14,2%.

7. При зварюванні рівнокатетних швів встановлено, що при збільшенні розміру катету від 3 до 4 мм, при радіусах переходу 0,5 і 1,0 мм, величина ККН майже не змінюється. Це дозволяє використовувати збільшений катет для підвищення міцності зварного з'єднання за рахунок зменшення напружень в перерізі кутового шва.

8. Увігнута форма шва, величиною до 30% від катету, забезпечує найнижчі значення ККН на рівні 1,792...1,537, у порівнянні з іншими формами шва.

9. Встановлено, що вплив геометрії зварного шва на концентрацію напружень спостерігається на відстанях, які не перевищують ~2 мм від лінії сплавлення.

10. Робота за комп'ютером негативно впливає на здоров'я людини. Для уникнення наслідків від роботи за комп'ютером необхідно дотримуватися наступних правил: зменшити час перебування за комп'ютером до мінімуму, робити перерви у роботі, виконувати неважкі фізичні вправи, які допоможуть тілу зняти напруження. Під час виникнення надзвичайної ситуації знати послідовність дій та дотримуватися їх.

Перелік посилань

1. Кривов, Г.О. Виробництво зварних конструкцій [Текст]: Підручник / Г.О. Кривов, К.О. Зворикін. – К.: КВІЦ, 2012. – 896 с.: 748 іл.: 66 табл.: 3,5 см. – Бібліогр.: с. 874-886. – 500 пр. - ISBN 978-966-2003-75-8
2. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад Б. Е. Патона М., «Машиностроение», 1974. 768 с.
3. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – Пер. с англ. – М.: Мир. – 1977. – 302 с.
4. Навроцкий Д.И. Расчет сварных соединений с учетом концентрации напряжений / М.: Машиностроение, 1968. - 171 с.
5. Кархин В.А. Концентрация напряжений в стыковых соединениях / В.А. Кархин, Л.А. Копельман // Свароч. пр-во. – 1976. – №2. – С. 6-7.
6. Кархин В.А. Распределение напряжений в сварных стыковых соединениях при растяжении / В.А. Кархин, А.А. Ксенофонтов // Известия вузов. – 1985. – №2. – С. 136-138.
7. Турмов Г.П. Определение коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях / Г.П. Турмов // Автомат. Сварка. – 1976. – №10. – С. 14-17.
8. Березовский Б.М. Коэффициент концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях / Б.М. Березовский, О.А. Бакши // Труды ЧПИ. – Челябинск, 1981. – №226. – С. 31-40.
9. Стаканов В.И. Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях / В.И. Стаканов, В.И. Костылев, Ю.К. Рыбин // Автомат. Сварка. – 1987. – №11. – С. 19-23.
10. Рыбин Ю.И. Исследование методом конечных элементов влияния геометрических параметров швов тавровых и крестообразных сварных соединений на концентрацию напряжений / Ю.И. Рыбин, В.И. Стаканов, В.И. Костылев и др. // Автомат. Сварка. – 1982. – №5. – С. 16-20.

11. Ильин А.В. Методы расчета циклической прочности сварных соединений / А.В. Ильин, Г.П. Карзов, В.П. Леонов и др. – Л.: ЛДНТП. – 1983. – 32 с.
12. Бакши О.А. Влияние геометрии угловых швов на коэффициент концентрации и градиенты напряжений в тавровых соединениях / О. А. Бакши, Н.Л. Зайцев, Л.Б. Шрон // Свароч. пр-во. – 1982. – №8. – С. 3-5.
13. Nihai M. Statistical analyses on fatigue strength of arc-welded joints using covered electrodes under various welding conditions with particular attention to their shape / M. Nihai, E. Sasaki, M. Kanao, M. Inagaki // Trans. Nat. Res. Inst. Metals. – 1981. – №2. – P 21-33.
14. IIW XIII-1098-83. A study on fatigue evaluation of A5083-o/A5183 stiffened plate structure / K. Sakai, T. Uemure, N. Iino. – 20 p.
15. Кархин В.А. Концентрация напряжений в сварных соединениях / В.А. Кархин, А.А. Ксенофонтов // Проблемы прочности. – 1987. – №7. – С. 96-98.
16. Gurney T.R. Fatigue of welded structures / Gurney T.R. –London: Cambridge University Press, 1979. – 456 p.
17. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях [Текст]: навч. посіб./ В.М. Прохоренко, О.В. Прохоренко . – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 268 с. – Бібліогр.: с.267. – 400 пр.
18. Сварка в машиностроении: Справочник. – В 4-х т. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 3. – 567 с.
19. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / Под ред. С.А. Куркина. – М: Машиностроение, 1975. – 376 с.
20. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение. – 1975. – 488 с.
21. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформаций конструкций: Учеб. пособие / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа. – 1982. – 272 с.

22. Кархин В.А. Влияние геометрических параметров стыковых, тавровых и крестовых соединений на коэффициент концентрации напряжений / В.А. Кархин, В.И. Костылев, В.И. Стаканов // Автомат. Сварка. – 1988. – №3. – С. 6-11.
23. ГОСТ 5264-80 Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы
24. Николаев Г. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: Учеб. для вузов / Под ред. Г. А. Николева. – М.: Высш. шк., 1990. – 446 с.
25. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.
26. Окерблом Н. О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. – М., Л.: Машиностроение, 1950. – 42 с.
27. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. – Ленингр. изд-во «Судостроение», 1974. – 286 с.
28. Винокуров В. А. Сварочные деформации и напряжения. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
29. Трочун И. П. Внутренние усилия и деформации при сварке. – М.: Машгиз, 1964. – 245 с.
30. Талыпов Г. Б. Сварочные деформации и напряжения. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
31. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 245 с.
32. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. D. The finite element method for solid and structural mechanics. – Elsevier, 2014. – 657 p.
33. Goldak J. A. Computational welding mechanics. – Springer, 2005. – 325 p.
34. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. – М.: МЭИ, 2006. – 550 с.
35. ГОСТ 19281-89 - Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия

36. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки.
37. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
38. ДСТУ EN ISO 14341:2014 Матеріали зварювальні. Електродні дроти та наплавлений метал у захисному газі плавким електродом нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація
39. ГОСТ 2246-70 Проволока стальная сварочная. Технические условия.
40. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
41. ГОСТ 23118-99 Конструкции стальные строительные. Общие технические условия.
42. Яхно Б. Розрахунок зварних з'єднань з використанням програмного комплексу Abaqus: методичні вказівки / К.:НТУУ «КПІ», 2013. – 64 с.
43. Винокуров В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.
44. В. М. Лапін. Безпека життєдіяльності людини. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://pidruchniki.ws/15890315/bzhd/kompyuter_zdorovya_lyudini.
45. О. П. Мягченко. Безпека життєдіяльності людини і суспільства. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://pidruchniki.ws/18210712/bzhd/pravila_bezpeki_pri_roboti_kompyuterom.
46. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98, затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7 – Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>.

ДОДАТКИ